



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA TÉCNICA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

“Diseño de un basculante e
integración del mismo en una
motocicleta de competición”

Autora: **Sara García Álvarez**

Tutor: **Higinio Rubio Alonso**

Leganés, Octubre 2012

Título: DISEÑO DE UN BASCULANTE E INTEGRACIÓN DEL MISMO EN UNA
MOTOCICLETA DE COMPETICIÓN

Autor: SARA GARCÍA ÁLVAREZ

Tutor: HIGINIO RUBIO ALONSO

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 1 de Octubre de 2012 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción	11
1.1. Motivación del proyecto.....	11
1.2. Objetivos	13
1.3. Etapas del proyecto	14
1.4. Estructura del documento.....	15
2. Estado de la tecnología	16
2.1. Introducción.....	16
2.2. Comparación estructural	17
2.3. Introducción a la suspensión	19
2.4. Historia	21
2.5. Horquilla.....	22
2.5.1. Tipos.....	22
2.5.2. Partes	24
2.5.3. Funcionamiento.....	25
2.5.4. Regulación.....	28
2.6. Amortiguador	33
2.6.1. Tipos.....	33
2.6.2. Partes	34
2.6.3. Regulación.....	35
2.7. Amortiguador de dirección.....	38
2.8. Manillar con amortiguación integrada.....	39
3. Conceptos mecánicos aplicables al proyecto	41
3.1. Esfuerzo.....	41
3.2. Resistencia	41
3.3. Rigidez.....	41
3.4. Tensión y deformación	42
3.6. Densidad	44
3.7. Amortiguación.....	44
3.7.1. Introducción	44
3.7.2. Tipos de amortiguamiento	44
3.8. Bases en el cálculo de los parámetros de amortiguación.....	45
3.9. Análisis de la función de transferencia	46
3.9.1. Posición de polos y ceros	46
3.9.2. Análisis en el dominio de la frecuencia	46
3.10. Muelles.....	47
3.10.1.Introducción.....	47
3.10.2.Materiales y disposiciones	47
3.10.3.Muelles helicoidales.....	50
3.10.4.Cálculo del parámetro K.....	50

3.10.5.Cálculo de la geometría del muelle.....	51
3.11. Materiales.....	52
3.11.1.Aluminio.....	52
3.11.2.Titanio	52
3.11.3.Magnesio	52
3.11.4.Materiales compuestos	53
3.11.5.Cromo-Molibdeno.....	53
3.11.6.Acero	53
4. Herramienta de modelado: ProEngineer	56
4.1. Tipos de archivo.....	56
4.2. Directorio de trabajo.....	57
4.3. Borrado de memoria.....	58
4.4. Modelado de piezas sólidas	59
4.5. Modelado de chapa	63
4.6. Conjuntos.....	63
4.7. Planos	64
4.8. Módulo Mechanics	65
5. Metodología.....	70
5.1. Pautas	70
5.2. Bases técnicas de la competición	72
5.2.1. Cotas generales	73
5.2.2. Pesos	73
5.2.3. Bastidor	73
5.2.4. Suspensión trasera.....	73
5.2.5. Freno trasero	74
5.2.6. Estribas.....	74
5.2.7. Basculante	74
5.2.8. Llantas y neumáticos.....	74
5.3. Diseño principal	75
5.4. Parámetros en el análisis de la pieza	78
6. Desarrollo del proyecto	79
6.1. Diseños preliminares.....	79
6.2. Basculante monobrazo	83
6.3. Evolución de los diseños	86
6.4. Análisis de modelos finales.....	92
6.4.1. Análisis de pesos y precios.....	93
6.4.2. Análisis del modelo 1a.....	95
6.4.3. Análisis del modelo 1b	99
6.4.4. Análisis del modelo 2	102
6.4.5. Análisis del modelo multitubular.....	107
6.5. Comparación de resultados	111

6.5.1. Tensión	111
6.5.2. Desplazamientos.....	112
6.5.3. Peso	113
6.5.4. Precio	113
6.6. Elección del diseño óptimo	114
7. Presupuesto	115
8. Conclusiones y desarrollos futuros	117
8.1. Conclusiones	117
8.2. Desarrollos futuros	119
9. Bibliografía.....	120
9.1. Referencias bibliográficas	120
9.2. Referencias de la web	121
ANEXO A. Planos	122
A1. Modelo 1a	122
A2. Modelo 1b.....	123
A3. Modelo 2.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Logo Motostudent [15].....	11
Figura 2. Ensamblaje en ProEngineer del modelo MS1 [20]	12
Figura 3. Basculante monobrazo [22]	16
Figura 4. Sistema Paralever [24]	16
Figura 5. Esquema movimientos basculantes simples y reforzados [2]	17
Figura 6. Gráficos de deformaciones sufridas por los diferentes tipos de basculantes [2]	18
Figura 7. Esquema de un sistema amortiguado [13]	19
Figura 8. Motocicleta con horquilla convencional [21]	20
Figura 9. Motocicleta con horquilla convencional [11]	22
Figura 10. Motocicleta con horquilla invertida [6]	22
Figura 11. Horquilla de cartucho [3]	23
Figura 12. Despiece de una horquilla de cartucho [6]	24
Figura 13. Recorrido del fluido en el proceso de compresión [3]	25
Figura 14. Recorrido del fluido en el proceso de extensión [3]	25
Figura 15. Recorrido del fluido en el proceso de compresión [3]	26
Figura 16. Recorrido del fluido en el proceso de extensión [3]	26
Figura 17. Gráfica fuerza ejercida por el muelle VS movimiento de la horquilla [2]	27
Figura 18. Esquema sobre parámetros ajustables en una horquilla de cartucho [22]...	28
Figura 19. Gráfica comportamiento del muelle según la fuerza aplicada [10]	29
Figura 20. Gráficas de fuerza de compresión VS velocidad	30
Figura 21. Medición del recorrido estático [6]	31
Figura 22. Gráfica sobre la variación de diferentes parámetros	32
Figura 23.1: Amortiguador de extensión 3: Precarga del muelle [6]	32
Figura 24.2: Amortiguador de compresión [6]	32
Figura 25. Tipos de amortiguadores [26]	33
Figura 26. Despiece de un amortiguador [6].....	34
Figura 27. Muelle lineal [23].....	35
Figura 28. Muelles progresivos [23].....	35
Figura 29. Medida A [10].....	35
Figura 30. Medida B [10]	36
Figura 31. Medida C [10]	36
Figura 32. Tornillos de ajuste del amortiguador	37
Figura 33. Amortiguador de dirección off-road [21]	38
Figura 34. Amortiguador de dirección carretera [21].....	38
Figura 35. Despiece de un	38
Figura 36. Manillar con suspensión integrada (imagen cedida por Torsal S.L.) [27].....	39
Figura 37. Manillar con suspensión integrada (imagen cedida por Torsal S.L.) [27]	40
Figura 38. Diagrama tensión – deformación [12].....	42
Figura 39. Gráfica de los tipos de amortiguación [12].....	44
Figura 40. Esquema simplificado de un sistema de suspensión [13]	45
Figura 41. Uso de la goma en una horquilla (Greeves) [10].....	47
Figura 42. Sistema de suspensión Fournales de gas [1].....	48
Figura 43. Sistema de suspensión patentado por Yamaha y Öhlins con piezas de fibra de vidrio [1]	49

Figura 44. Diagrama fuerza del muelle VS compresión del muelle [2].....	51
Figura 45. Gráfica de las propiedades de los materiales Reynolds [28]	54
Figura 46. Gráfica de las propiedades de los materiales Reynolds [28]	54
Figura 47. Logo acero Reynolds [28].....	55
Figura 48. Elección del tipo de archivo en ProEngineer [18]	56
Figura 49. Definir directorio de trabajo en ProEngineer [18]	57
Figura 50. Borrado de memoria en ProEngineer [18].....	58
Figura 51. Programa esbozo y herramientas de modelado [18]	59
Figura 52. Programa esbozo	60
Figura 53. Protrusión por revolución	60
Figura 54. Protrusión helicoidal [18].....	60
Figura 55. Protrusión por secciones [18]	61
Figura 56. Elección protrusión por barrido [18]	61
Figura 57. Protrusión por barrido [18]	61
Figura 58. Pasos para llevar a cabo un patrón [18]	62
Figura 59. Modelados de chapa en ProEngineer [18].....	63
Figura 60. Conjunto.....	63
Figura 61. Plano en ProEngineer con cuatro vistas [18]	64
Figura 62. Comandos en Mechanica	65
Figura 63. Definición del material [18]	66
Figura 64. Restricciones y cargas [18].....	67
Figura 65. Ajustes para crear el mallado [18].....	68
Figura 66. Dimensiones de la malla [18]	68
Figura 67. Análisis de la pieza [18].....	69
Figura 68. Pantalla de elección de resultados [18].....	69
Figura 69. Cotas límite de la motocicleta [16].....	72
Figura 70. Motor modelado	75
Figura 71. Plano de la llanta [16]	76
Figura 72. Plano del amortiguador [16]	77
Figura 73. Fuerzas en una motocicleta en movimiento [22].....	78
Figura 74. Diseño 2D	79
Figura 75. Diseño de basculante mecanizado	80
Figura 76. Diseño de basculante multitubular 1	80
Figura 77. Diseño de basculante multitubular 2	80
Figura 78. Conjunto trasero.....	81
Figura 79. Diseño de basculante multitubular 3	81
Figura 80. Diseño de basculante multitubular 4	82
Figura 81. Modelo 2 de basculante monobrazo.....	83
Figura 82. Modelo 1 de basculante monobrazo.....	83
Figura 83. Líneas seguidas para el diseño de basculante monobrazo.....	83
Figura 84. Restricciones unión chasis	84
Figura 85. Restricciones unión amortiguador	84
Figura 86. Cargas sobre la estructura	85
Figura 87. Modelo 1 de basculante monobrazo.....	86
Figura 88. Modelo 2 de basculante monobrazo.....	86
Figura 89. Modelo 1 con filos redondeados.....	87
Figura 90. Modelo 2 con filos redondeados.....	87

Figura 91. Modelos con correcciones aplicadas	88
Figura 92. Soporte de pinza	88
Figura 93. Separador corona	89
Figura 94. Separador disco	89
Figura 95. Conjunto con modelo de basculante 1	90
Figura 96. Conjunto con modelo de basculante 2	91
Figura 97. Modelo 1a: Basculante macizo	92
Figura 98. Modelo 1b: Pieza igual que la anterior pero con pared de 0,5 mm de espesor	92
Figura 99. Modelo 2: Basculante macizo aligerado	92
Figura 100. Gráfica peso	93
Figura 101. Gráfica precio	94
Figura 102. Restricciones y cargas del basculante 1a	95
Figura 103. Valores de tensión del basculante 1a	95
Figura 104. Valores de tensión del basculante 1a	96
Figura 105. Visualización de los ejes	97
Figura 106. Valores de deformación en X del basculante 1a	97
Figura 107. Valores de deformación en Y del basculante 1a	98
Figura 108. Valores de deformación en Z del basculante 1a	98
Figura 109. Valores de tensión del basculante 1b	99
Figura 110. Valores de tensión del basculante 1b	99
Figura 111. Valores de deformación en el eje X del basculante 1b	100
Figura 112. Valores de deformación en el eje Y del basculante 1b	100
Figura 113. Valores de deformación en el eje Z del basculante 1b	101
Figura 114. Modelo de basculante 2	102
Figura 115. Restricciones y cargas del modelo 2	102
Figura 116. Tensiones del modelo 2	103
Figura 117. Tensiones del modelo 2	103
Figura 118. Tensiones del modelo 2	104
Figura 119. Valores de deformación en el eje X del basculante 2	105
Figura 120. Valores de deformación en el eje Y del basculante 2	105
Figura 121. Valores de deformación en el eje Z del basculante 2	106
Figura 122. Diseño del basculante multitubular	107
Figura 123. Restricciones y cargas del basculante multitubular	107
Figura 124. Tensiones del basculante multitubular	108
Figura 125. Pico de tensión del basculante multitubular	108
Figura 126. Tensión del basculante multitubular reescalada	108
Figura 127. Valores de deformación en el eje X del basculante multitubular	109
Figura 128. Valores de deformación en el eje Y del basculante multitubular	109
Figura 129. Valores de deformación en el eje Z del basculante multitubular	110
Figura 130. Gráfica comparativa de tensión máxima en un punto cualquiera entre modelos de acero	111
Figura 131. Gráfica comparativa de desplazamiento entre modelos de acero	112
Figura 132. Gráfica comparativa de peso entre modelos de acero	113
Figura 133. Gráfica comparativa de precio entre modelos de acero	113
Figura 134. Basculante escogido: Modelo 2	114
Figura 136. Modelo 2	118

Figura 135. Modelo 1	118
Figura 137. Vista general del scooter Shocked.....	119
Figura 138. Detalle del sistema 2WD	119

ÍNDICE DE ESQUEMAS Y TABLAS

Esquema 1. Flujo de trabajo	70
Tabla 1. Peso de los modelos con diferentes materiales	93
Tabla 2. Precio de la materia prima utilizando diferentes materiales	94
Tabla 3. Tensión máxima de los modelos en acero	111
Tabla 4. Desplazamientos de los modelos en acero	112
Tabla 5. Precio de la materia prima de los modelos en acero	113
Tabla 6. Coste de personal	115
Tabla 7. Coste de equipos informáticos	115
Tabla 8. Coste de licencias	116
Tabla 9. Otros costes	116
Tabla 10. Costes totales	116

1. Introducción

1.1. Motivación del proyecto

Este proyecto se ancla en el marco de la construcción de una moto 3 para la competición internacional 'Motostudent', cuyo objetivo no es otro que el de dar a alumnos de distintas universidades la oportunidad de aprender y conocer más profundamente el mundo de la motocicleta enfocado a sus estudios de ingeniería. Moviéndose por su pasión por la moto, este grupo de alumnos se ha aventurado a ahondar en los entresijos de esta máquina y aprender un poco más sobre su estructura, funcionamiento y puesta a punto.

La finalidad del proyecto es el diseño del basculante que posteriormente será utilizado en la motocicleta presentada al concurso MotoStudent II en representación a la Universidad Carlos III de Madrid. Así mismo se llevarán a cabo los diferentes estudios de análisis y simulación para la optimización del mismo.

La competición MotoStudent promovida por la fundación Moto Engineering Foundation (en adelante MEF) es un desafío entre equipos universitarios de distintas universidades españolas, europeas y del resto del mundo. Consiste en diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición de pequeña cilindrada 250 4T, que competirán con su evaluación pertinente, en unas jornadas que se llevarán a cabo inicialmente en las instalaciones de la Ciudad del Motor de Aragón. Para el propósito de esta competición, el equipo universitario debe considerarse integrado en una empresa fabricante de motos de competición, para desarrollar y fabricar un prototipo bajo unos condicionantes técnicos y económicos dados. La competición en sí misma es un reto para los estudiantes, donde estos en un periodo de tiempo de tres semestres han de demostrar y probar su capacidad de creación e innovación y la habilidad de aplicar directamente sus capacidades como ingenieros en comparación con los otros equipos de universidades de todo el mundo.



Figura 1. Logo Motostudent [15]

Para poder llevar a cabo este objetivo de crear un basculante óptimo para nuestra motocicleta, hemos de modelar la pieza junto con el sistema de amortiguación trasero, insertar las restricciones de movimiento y las cargas que más se ajusten a las situaciones que va a sufrir el elemento y, por último, analizar nuestro modelo. Primeramente elaboraremos una lista de los límites impuestos por la organización. Posteriormente, teniendo en cuenta cada uno de los requisitos que nuestra

motocicleta ha de tener, acotaremos otro grado más nuestro diseño, tomando los puntos de referencia de anclaje al motor. Con estos datos, comenzaremos a crear los primeros diseños, los cuales simularemos en situaciones críticas para así poder observar el comportamiento del mismo. Una vez verificado su aguante, trataremos de mejorar sus características (ligereza, flexibilidad, coste, etc.) y la ensamblaremos con el chasis y distintas piezas circundantes para poder entonces crear una visión global de la motocicleta, que posteriormente servirá para hacer las simulaciones dinámicas del conjunto y saber aún más datos sobre su futuro comportamiento.

Este proyecto en concreto, se fundamenta en el diseño y la construcción de una de las piezas básicas de una motocicleta: el basculante. Para poder llevar a cabo este proyecto, nos hemos beneficiado de las ventajas del software de elementos infinitos ProEngineer. Hoy en día es inviable la construcción de una motocicleta o máquina de características similares, sin la ayuda de un software especializado, que modele y analice el comportamiento de cada una de las partes de la misma.

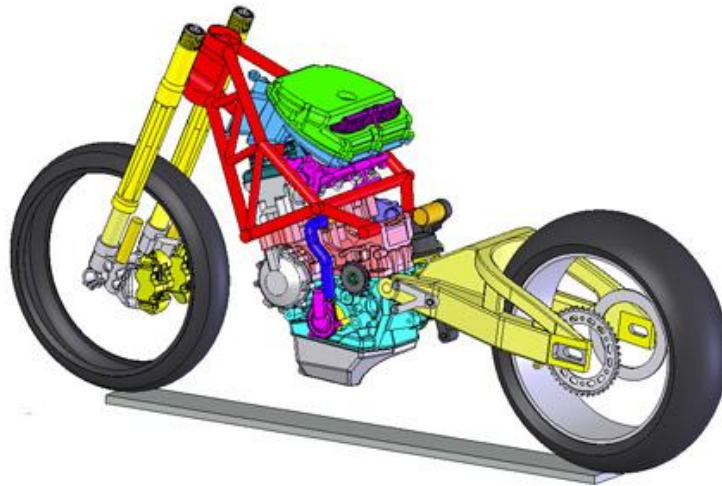


Figura 2. Ensamblaje en ProEngineer del modelo MS1 [20]

1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente proyecto es *el diseño de un basculante para una motocicleta de competición para el certamen MotoStudent*. Dicho diseño estará enmarcado en las prescripciones que describe la organización del MotoStudent. La finalidad última es incorporar el diseño aquí seleccionado en la motocicleta de competición que presente la Universidad Carlos III de Madrid al citado certamen.

Para llegar a este objetivo principal, tendremos que desarrollar, además, los siguientes objetivos secundarios:

- Recopilación de datos técnicos sobre motocicletas e información específica.
- Establecer los criterios de selección para la elección del basculante entre las diferentes propuestas.
- Modelado de los diferentes elementos de los basculantes propuestos en ProEngineer.
- Simulación por el método de los elementos finitos (con el módulo "Mechanica" de ProEngineer) de los modelos de basculante propuestos.
- Generación de las tablas de características (según criterios establecidos).
- Análisis de los resultados obtenidos y elección del diseño final.

En este trabajo también se recogerán otros temas colaterales con él aquí propuesto. Por ejemplo, se realizará un análisis detallado del sistema de suspensión (función de transferencia, longitud de la bieleta, etc.), se estudiará la pieza a fatiga, se simulará el conjunto completo de la motocicleta, etc.

1.3. Etapas del proyecto

Nuestro proyecto ha tenido un largo proceso de elaboración, el cual se basa en las siguientes etapas:

- Recopilar la máxima información posible sobre esta nueva categoría del mundial de motociclismo: Moto 3, intentando así tener un punto de partida al que anclar nuestro diseño.
- Con esa información ya sobre la mesa, comenzamos a trabajar en lo que sería nuestro propio diseño.
- Creación de varias líneas de trabajo (chasis, basculante, aerodinámica, etc.).
- Creación de subgrupos. Debido al sobredimensionamiento de personal, podíamos separarnos en subgrupos y que cada uno de ellos aportara un modelo diferente; así obtuvimos varios diseños, los cuales hicimos progresar en cuanto a estructura se refiere en las líneas en las que nuestro director técnico, Carlos Beltrán nos asesoró.
- Feedback de los demás departamentos para obtener puntos de referencia y anclaje.
- Análisis de los modelos ya refinados, observar sus propiedades y mejorar la pieza. Después de llevar a cabo este paso las veces que fueron necesarias, procedimos a elegir el modelo óptimo de todos los diseñados.

1.4. Estructura del documento

Este documento se ha organizado por capítulos; para una mejor comprensión del mismo, procederemos a explicar brevemente cada uno de ellos.

- Introducción: trata de enmarcarse al lector en el ámbito de la motocicleta, así como se trata de explicar también las motivaciones y pasos seguidos para llevar a cabo este proyecto.
- Segundo capítulo: se aclara el objetivo del proyecto, el cual no es otro que la competición Motostudent.
- Tercer capítulo: engloba tanto los conceptos básicos para el entendimiento del proyecto, como las bases técnicas que acota la organización en base a los diseños de las diferentes piezas.
- Cuarto capítulo: se da una pequeña explicación a todos los conceptos ingenieriles, sobre todo los que conciernen al tema de los materiales, pero también sobre elementos de la motocicleta como son muelles, amortiguadores, teoría de los materiales, etc.
- Quinto capítulo: se explica la metodología del proyecto, podemos encontrar un pequeño resumen de las funciones básicas del software utilizado para implementar nuestros diseños, ProEngineer.
- El capítulo 6 es uno de los principales; en él se desarrolla el proyecto en sí y se plasman todos los cálculos llevados a cabo para el diseño.
- El séptimo apartado engloba las conclusiones extraídas sobre la totalidad del proyecto y todo el trabajo que este ha supuesto.
- El octavo artículo trata sobre los futuros desarrollos que podrán implementarse.
- Por último, contamos con una detallada bibliografía donde poder consultar cualquiera de los datos que se encuentran en el proyecto.

2. Estado de la tecnología

2.1. Introducción

Con la finalidad de ahondar en el verdadero tema de estudio de este proyecto, introduciremos la historia de este tipo de basculantes, ya que el diseño sobre el que se trabaja es un monobrazo.

Los basculantes monobrazo se han usado desde hace mucho tiempo en pequeños ciclomotores y scooters, pero no empezaron a considerarse como una opción seria para motocicletas deportivas de gran cilindrada y motos de competición hasta que no aparecieron las Elf de resistencia diseñadas por Andre de Cortanze. Desde entonces ha existido diversidad de opiniones con respecto a esta solución. Honda lo ha empleado en una gran variedad de motos deportivas y de carreras, tanto con transmisión por cadena como por cardan; Ducati ha tenido mucho éxito en los circuitos, mientras BMW ha pasado a emplear el monobrazo de forma exclusiva en todos sus modelos con transmisión por cardan, primero con un brazo rígido muy simple y más tarde con un sistema articulado llamado “paralever”, el cual podemos observar en la fig.4, que controla el levantamiento y el squat.



Figura 3. Basculante monobrazo [22]

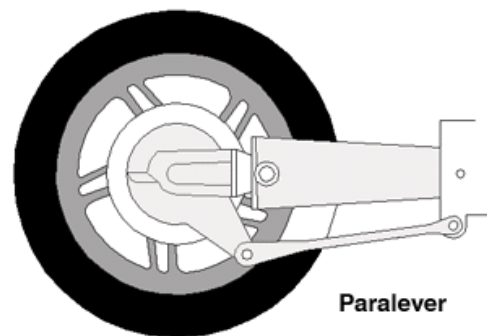


Figura 4. Sistema Paralever [24]

Asumiendo que ambas variantes tienen la misma geometría (misma longitud y los mismos puntos de anclaje al chasis) y que tanto el muelle como el amortiguamiento son iguales, compararemos ambos tipos de basculantes para ver realmente las ventajas y desventajas de ambos; los criterios utilizados serán:

- Rigidez estructural
- Peso total
- Masa no suspendida.

2.2. Comparación estructural

Dado que el diseño real de un basculante monobrazo y de uno de dos brazos varía tanto, resulta difícil poder compararlos. Los basculantes monobrazo para transmisión por cadena al estilo de los que han diseñado Honda, Ducati y otros, utilizan formas muy complejas, debido a que montan la corona de la cadena por el lado de fuera, variando así las tensiones generadas.

Las propiedades estructurales de estos brazos se pueden evaluar utilizando técnicas de análisis por elementos finitos. Es un método de cálculo por ordenador que considera que la estructura está compuesta por muchos elementos infinitesimales unidos de acuerdo a unas reglas determinadas, para formar la pieza completa. Normalmente los basculantes monobrazo para motos con transmisión por cardán tienen una construcción más sencilla.

Las características de la deformación de un basculante tradicional dependen en gran medida de la naturaleza y la rigidez del eje de la rueda y de su método de anclaje. El peor caso lo encontramos en aquellos basculantes que tienen una fina chapa en su extremo con una ranura para el ajuste de la cadena; este caso se acerca mucho al de un eje con articulaciones en ambos extremos. Por el contrario, el caso más favorable probablemente lo encontremos en máquinas con transmisión final por cardán, que suelen tener un eje con un anclaje muy rígido.

En la figura 5 se muestra la diferencia entre la utilización de los diferentes ejes antes nombrados.

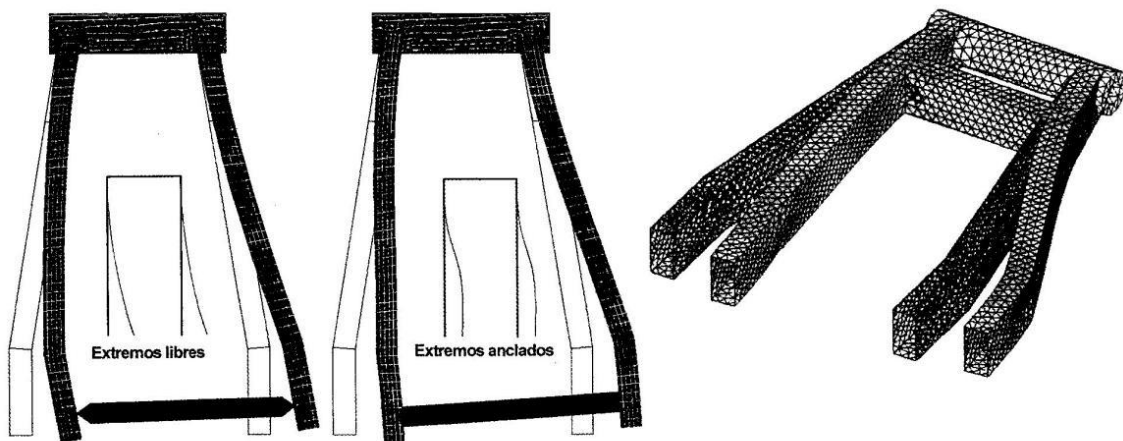


Figura 5. Esquema movimientos basculantes simples y reforzados [2]

En el primer modelo, el eje no aporta ningún efecto rigidizador y en el segundo el eje tiene una unión completamente sólida con el basculante. En realidad, un basculante sería una mezcla de ambos extremos.

La deformación torsional del basculante tradicional tiene 3 fuentes principales de flexibilidad: torsión en el eje de pivotamiento del basculante, flexión vertical de los brazos y torsión de los brazos laterales; este último depende fundamentalmente del tipo de anclaje del eje de la rueda, al igual que en caso de la flexión lateral.

La figura 6 nos muestra las deformaciones (en mm) sufridas por los diferentes tipos de basculantes en estudio.

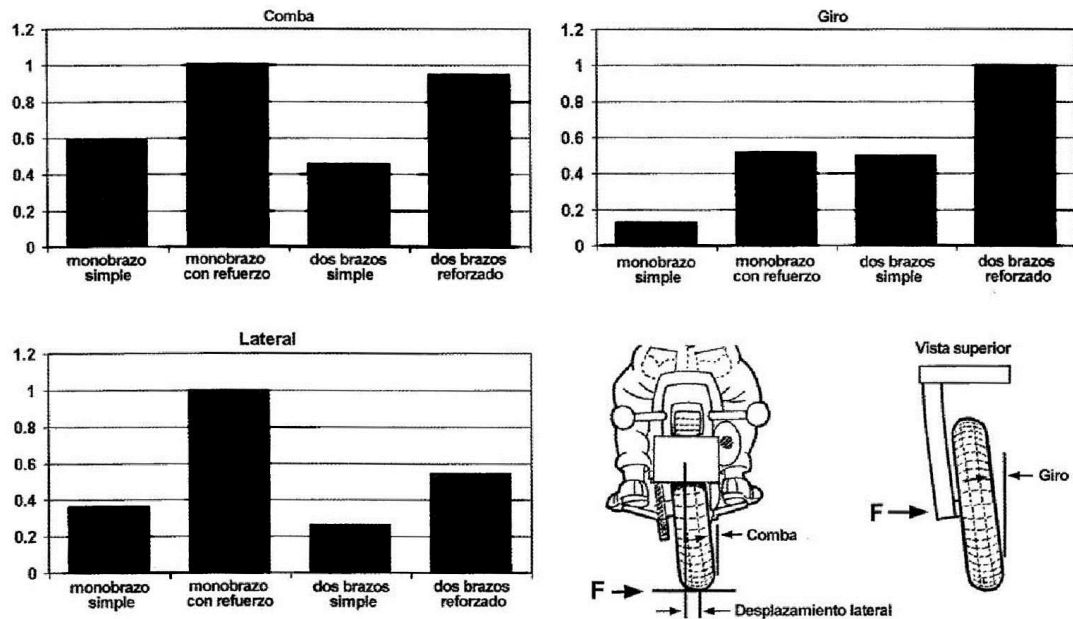


Figura 6. Gráficos de deformaciones sufridas por los diferentes tipos de basculantes [2]

Podemos ver que en los dos ejemplos que analizamos ninguno tiene una ventaja clara sobre el otro. El monobrazo reforzado y el basculante de dos brazos reforzado (tradicional) con un segundo tubo transversal tienen prácticamente la misma rigidez en lo que se refiere a la variación del ángulo de comba. En cuanto al desplazamiento lateral, el monobrazo es casi el doble de rígido, pero la situación es la contraria en el ángulo que gira la rueda (ángulo de guiñada). En el ejemplo de dos brazos la resistencia de la rueda a girar con un movimiento de guiñada depende mucho de la disposición del diseño. Por ejemplo si los dos brazos son paralelos, tendremos un ángulo de giro muy pequeño a pesar de la flexibilidad lateral de los brazos. Por el contrario, si los brazos se abren hacia la parte trasera, como suele ocurrir casi siempre en la práctica, entonces la rueda girará cierto ángulo, tal y como podemos ver en la fig. 6. Así pues, resulta complicado generalizar sobre las características del diseño de doble brazo. Para saber realmente cual de los diseños funcionará mejor en nuestra motocicleta, hemos de utilizar el análisis por elementos finitos para acotar la diferencia entre los diferentes basculantes diseñados. Más adelante se mostrarán dichos estudios sobre los dos basculantes monobrazo optimizados.

2.3. Introducción a la suspensión

Dentro del conjunto trasero de la motocicleta, una de las partes más destacables es la amortiguación. Se ha decidido exponer dicho tema debido a que, con su completa comprensión, podremos mejorar el comportamiento de nuestro basculante, lo cual es uno de nuestros objetivos primordiales. Se ha escogido el entorno del motocross para el estudio del tema de suspensiones debido a su elevada importancia tanto para que el piloto pueda desarrollar una buena conducción, como para que las diferentes partes mecánicas de la motocicleta (sobretudo el chasis) sufran lo mínimo posible.

Los sistemas de suspensión son cruciales para determinar el comportamiento y la seguridad de cualquier vehículo. Dicho sistema trata de absorber las irregularidades del terreno para darnos más confort, mejorar la conducción y reducir la posibilidad de lesiones a los integrantes del habitáculo debidas a movimientos bruscos del mismo.

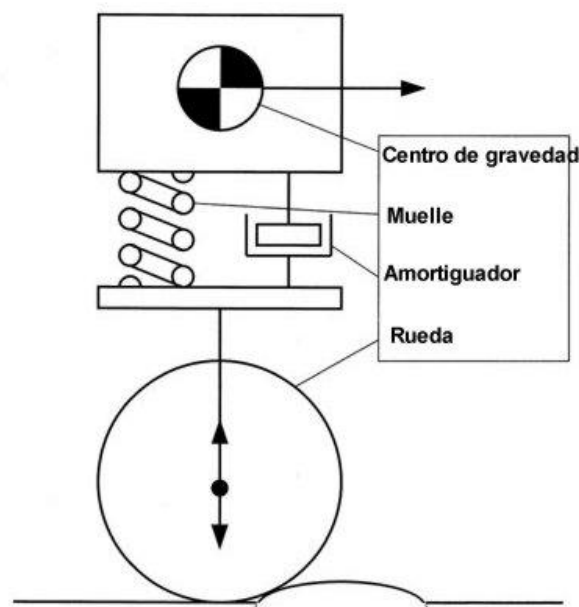


Figura 7. Esquema de un sistema amortiguado [13]

Las principales características técnicas que nos brinda un sistema de suspensiones bien regulado son, el aumento de la adherencia del neumático, así como la disminución de la distancia de frenado.

En el caso específico de las motocicletas, hemos de utilizar diferentes dispositivos para la rueda delantera y la trasera, ya que cada una está sometida a diferentes solicitaciones, véase reparto de pesos, transmisión de fuerzas de elementos colindantes, etc.

Las misiones principales de la suspensión en la motocicleta son, primeramente, mantener las ruedas en contacto con el suelo en todo momento para asegurar la tracción y aprovechar así toda la potencia de la motocicleta; también tiene como objetivo procurar que las partes de la moto que están ancladas a las ruedas, es decir, la masa no suspendida, se mantenga en una trayectoria rectilínea con

respecto al suelo. En ella influyen desde el estilo de conducción, los neumáticos, las presiones o la temperatura ambiente hasta el peso del piloto. La suspensión es una de las pocas formas que el usuario tiene de variar el comportamiento de su motocicleta.

Para lograrlo las suspensiones disponen de dos sistemas, el resorte y el freno hidráulico. El primero suele ser un muelle helicoidal, aunque a veces se trabaja con ballestas, elastómeros o barras de torsión. Su función es absorber la energía que se produce durante el desplazamiento de la masa suspendida (ruedas y la parte de la suspensión fija a ellas), para devolverla a su posición inicial una vez que ha cesado la causa que produce el desplazamiento (baches, fuerza centrífuga en las curvas, inercia al acelerar o frenar). El problema puede venir de las inercias de los resortes y del movimiento en el que liberan la energía ya que viene sucedido por oscilaciones de extensión y compresión. Para evitar que las suspensiones vayan extendiéndose y comprimiéndose constantemente mientras la moto circula, se instala un freno a estos movimientos parásitos: es el sistema hidráulico. Se intenta evitar al máximo la implicación del gas en una suspensión ya que cuando este se comprime, se calienta y varía su densidad; de este modo varía la regulación de la suspensión. De ahí que nunca hayan tenido éxito las suspensiones neumáticas en competición.

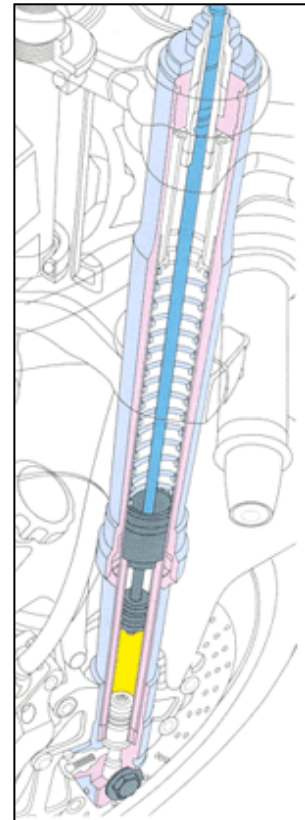


Figura 8. Motocicleta con horquilla convencional [21]

Mientras el recorrido del muelle depende de la fuerza que se aplique, el sistema hidráulico depende de la velocidad del desplazamiento. Un muelle se comprime más conforme aumenta la carga sobre él, un sistema hidráulico se endurece cuando aumenta la velocidad del desplazamiento.

En las especialidades off-road hayamos la máxima exigencia en el sistema de suspensión debido a las irregularidades del terreno, la energía, tanto cinética como potencial existente en la recepción de los saltos, etc.

El continuo trabajo de las mismas hace que éstas se vean sometidas a grandes cargas, altas temperaturas y esfuerzos de todo tipo; por ello, es sumamente importante, una buena preparación, ajustada y personalizada, para cada disciplina deportiva.

Así, los pilotos de enduro necesitarán una suspensión blanda, que pueda adaptarse rápidamente a la variabilidad del terreno por el que discurren. En motocross, por el contrario, se ha de hacer frente a curvas con peraltes, saltos donde se toma una gran altura, pilotaje en roderas, etc. por tanto, las exigencias que esto requiere, son mucho más duras que las de la anterior especialidad.

Para la optimización del comportamiento de la motocicleta, se necesita de la regulación personalizada del sistema de suspensión. Dicha regulación depende de varios factores, tales como el peso del piloto, el terreno y el estado del circuito, incluso el estilo de conducción del piloto influye en los reglajes. Para llevar a cabo un buen ajuste no sólo hay que disponer de los conocimientos necesarios, sino también de las reacciones de la moto, y, sobre todo, tener la sensibilidad adecuada para interpretar la información que se recibe de la moto.

2.4. Historia

Las primeras motocicletas especializadas en motocross nacieron en torno a 1959, con, por ejemplo, la Montesa Brio. En el 1960, la marca española montó el primer equipo dedicado específicamente al motocross y en el 1963, se fabrica en serie la Montesa Impala.

El motocross nació en diferentes épocas en cada uno de los rincones; por ejemplo, en 1920 en Inglaterra o en 1931 en España. La primera competición a nivel mundial dio comienzo en 1957.

Detrás usaban doble amortiguador y aproximadamente en el 84, cambiaron este por un monoamortiguador entre la rueda tras y el eje de basculante para aumentar el recorrido.

En el 87, la marca japonesa Suzuki introdujo las bieletas, las cuales son un conjunto de palancas que permiten dotar al sistema de progresividad. El diámetro del vástago tenía un volumen y al introducirse en el interior del amortiguador este aumentaba y para solucionar este problema se les dotó de un espacio con aire (hidrógeno) para que se comprimese. El problema es que no se podía regular el amortiguador y decidieron sacar una botella anexionada y en su interior un poco de aceite un pistón y el resto hidrógeno; de este modo se podrían regular desde fuera con unas válvulas.

En cuanto a las horquillas, empezaron siendo convencionales y por motivos estructurales se convirtieron en invertidas. Constan de un muelle y un hidráulico en su interior.

En el año 2002, se lanzó la última tecnología conocida, horquillas de cartucho. Se basan en aislar el hidráulico del aire, así cuando la motocicleta se mueva y vibre, el fluido se no se llenará de burbujas; así se solventó el problema de que, al final de la carrera, las suspensiones se volvieran blandas.

A continuación, definiremos y citaremos algunas de las características del basculante ahondando en la morfología de la suspensión.

El basculante es el componente principal de la suspensión trasera tanto de motocicletas como de ATVS. Su función consiste en sostener el eje trasero permitiendo pivotar verticalmente el conjunto y dejando así libertad a la suspensión para absorber las irregularidades encontradas.

Las primeras motocicletas no gozaban de suspensión trasera. Se utilizó como diseño de partida un basculante de bicicleta algo más reforzado.

Fueron implementados muchos tipos de suspensión: simple, paralelogramo deformable, cantilever, ...

A continuación, referiremos de modo más extenso cada una de las partes del sistema de suspensión, explicando cada una de ellas así como los tipos y regulaciones existentes tanto en la horquilla, como en el amortiguador de una motocicleta, adjuntando los dibujos, fotografías y planos necesarios para su total comprensión.

2.5. Horquilla

2.5.1. Tipos

Existen varias clasificaciones de horquillas; una de ellas es *convencional e invertida*; las horquillas tradicionales disponen de un muelle interior y de un sistema hidráulico formado por una barra fija a la parte inferior de la botella de la horquilla, sobre la que normalmente se sujeta el muelle, que se apoya en el otro extremo en la parte superior de la barra.

La horquilla invertida, de la cual podemos ver un ejemplo en la figura 10, se diferencia de la convencional en que está situada de modo opuesto, es decir, la botella está anclada a la tija y las barras a la rueda.

Sus ventajas son un menor peso suspendido y la reducción de movimiento en la parte que lleva los fluidos (la botella).



Figura 9. Motocicleta con horquilla convencional [11]



Figura 10. Motocicleta con horquilla invertida [6]

La siguiente clasificación a destacar es la de las horquillas *sin cartucho*, *con cartucho*, *con doble cartucho* y ahora ya *presurizadas* con sistemas cada vez más sofisticados de progresividad variable. Las horquillas sin cartucho son las más antiguas del mercado, sin embargo, en motocross están siendo sustituidas por las de cartucho debido a su mayor sensibilidad y suavidad en la primera parte del recorrido, y su progresividad y por lo tanto más dureza al final del recorrido.

Esta última, dispone en su interior de un cilindro anclado a la parte inferior llamado cartucho, que es recorrido durante el recorrido de la suspensión por un embolo sujeto a la parte superior. Tanto al final del émbolo como en la parte inferior del cartucho están emplazadas unas cajas de láminas, que permiten con una cierta dificultad el paso del aceite en un sentido, pero lo mantienen completamente libre en la otra dirección de desplazamiento.

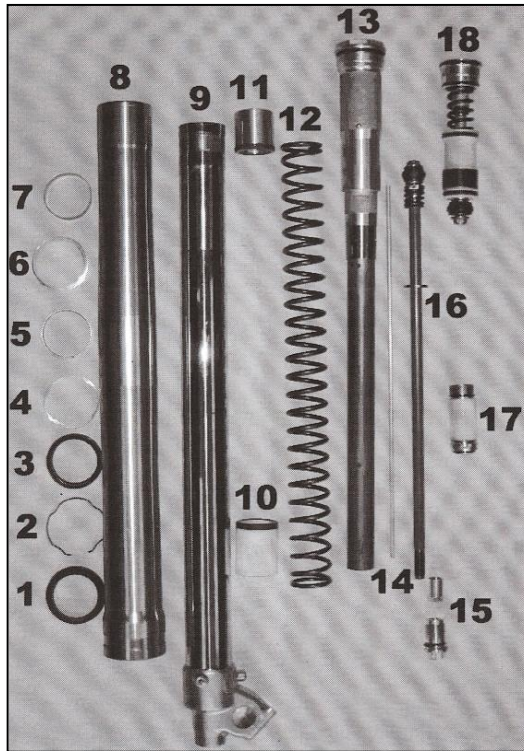
En el recorrido de compresión el émbolo superior se desplaza hacia abajo dejando pasar el aceite a la zona superior, pero el volumen que va ocupando la barra que lo soporta obliga al aceite del interior del cartucho a salir por la parte inferior. Antes de este desagüe está intercalado el paquete de láminas de compresión, que causa el efecto hidráulico. Su principal ventaja es la estabilidad de funcionamiento por carecer de cavitación.



Figura 11. Horquilla de cartucho [3]

2.5.2. Partes

Procederemos a ver el despiece de una horquilla invertida de cartucho ya que son las más utilizadas en la actualidad, explicando las partes más importantes de la misma.



1. Guardapolvo
2. Circlip
3. Retén de aceite
4. Arandela
5. Casquillo fricción inferior
6. Guía de casquillo
7. Casquillo fricción superior
8. Tubo exterior
9. Tubo interior
10. Asiento de muelle inferior
11. Asiento de muelle superior
12. Muelle
13. Cilindro
14. Varilla empujadora de aluminio
15. Ajustador extensión
16. Pistón y eje de extensión
17. Conjunto retén de cilindro
18. Sistema de compresión completo

Figura 12. Despiece de una horquilla de cartucho [6]

1. Guardapolvo: Sirve para que los residuos que puedan adherirse a la barra exterior, no puedan dañar la interior.

3. Retén de aceite: Es un elemento mecánico que tiene la misión de impedir el paso de fluidos entre las dos barras que se encuentran en movimiento relativo.

12. Muelle: Elemento que da rigidez al sistema. Esto lo consigue absorbiendo la energía que se produce durante el desplazamiento de la masa suspendida, devolviéndola a su posición inicial una vez que ha cesado la causa que produce el desplazamiento.

13. Cilindro o cartucho: Tiene las funciones de un amortiguador hidráulico de doble efecto.

14. Varilla empujadora: Es la encargada de activar el sistema hidráulico.

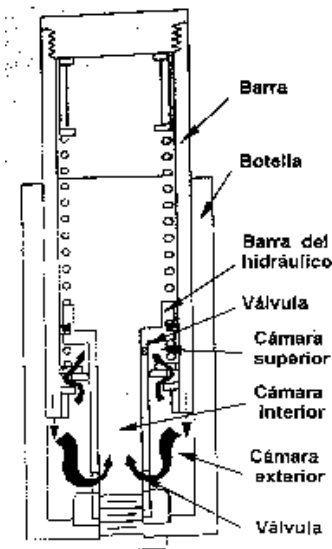
15. Ajustador de extensión: Tuerca mediante la cual regularemos el flujo de aceite que pasa a través de los huecos de las láminas, variando así la velocidad con la que la horquilla vuelve a su estado inicial.

2.5.3. Funcionamiento

Para el estudio del funcionamiento diferenciaremos entre los dos tipos de horquillas anteriormente explicados, las convencionales y las de cartucho, así como los dos recorridos posibles de las mismas, compresión y extensión.

a) Horquilla tradicional

- Recorrido de compresión



Cuando la horquilla se comprime, se reduce el volumen disponible para el aceite en la zona inferior; este es obligado a pasar por los orificios de la barra del hidráulico a su interior y de ahí a la parte superior de la horquilla.

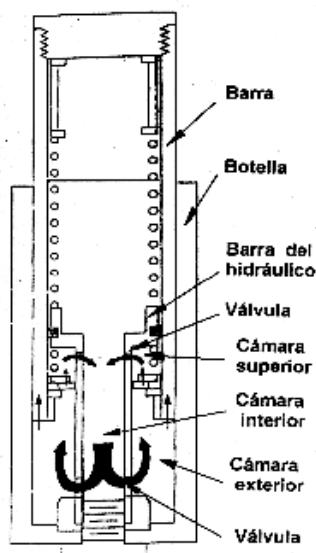
Al mismo tiempo, una pequeña cámara situada entre el extremo superior de la barra del hidráulico y el final de la barra de horquilla se llena de aceite por efecto de la sobrepresión a que es sometida la cámara inferior de la horquilla.

Estos movimientos de aceite son los que provocan un freno a la acción de compresión del muelle.

Son estos taladros los que se varían para ajustar la retención hidráulica que se desee.

Figura 13. Recorrido del fluido en el proceso de compresión [3]

- Recorrido de extensión



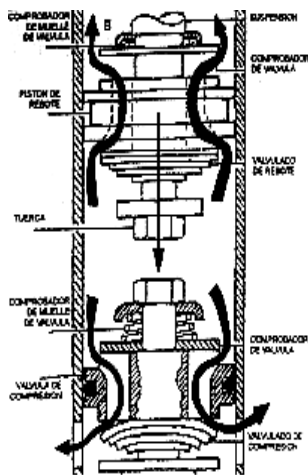
En la carrera de extensión el efecto es el contrario. La barra sube y deja espacio libre en la zona inferior de la horquilla, lo que obliga por una parte a que el aceite situado en la zona superior pase al exterior de la zona inferior atravesando los taladros inferiores, y al tiempo que el aceite almacenado en la cámara superior, al verse presionado por la subida de la barra de la horquilla, se introduzca en el interior de la barra del hidráulico.

El principal defecto de este sistema es la falta de regulación. Para variar el efecto hidráulico hay que modificar el tamaño de los taladros o la densidad del aceite, lo que significa realizar cambios permanentes.

Figura 14. Recorrido del fluido en el proceso de extensión [3]

b) Horquilla de cartucho

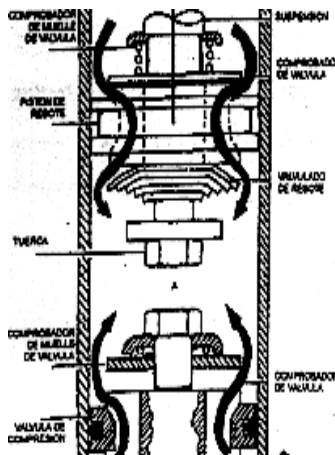
- Recorrido de compresión



En el recorrido de extensión, el volumen despejado por la salida de la barra que soporta el émbolo debe llenarse de aceite, y este vuelve a pasar por el desagüe inferior, y por las láminas del paquete de compresión, que en este caso no ofrecen resistencia. Sin embargo, el aceite de la parte superior del cartucho tiene que pasar por el paquete de láminas de extensión sujeto al émbolo, que en este caso produce el freno.

Figura 15. Recorrido del fluido en el proceso de compresión [3]

- Recorrido de extensión



La ventaja de estos sistemas es que pueden regularse con facilidad, ya que los paquetes de láminas se pueden auxiliar con sistemas formados por conductos estrechos, sobre los que una aguja puede variar su efecto fácilmente.

Figura 16. Recorrido del fluido en el proceso de extensión [3]

También cabe destacar que el comportamiento de la horquilla tiene dos grandes protagonistas; por un lado, la contribución del acero y por otro, la del aire como fluido de amortiguamiento.

En la gráfica de la figura 17 se puede ver que la fuerza total que ejerce la horquilla es una combinación de la fuerza propiamente mecánica del resorte, más la del fluido.

Ambas funcionan de forma paralela entre sí, siendo también proporcional, el nivel de aceite a la dureza del conjunto.

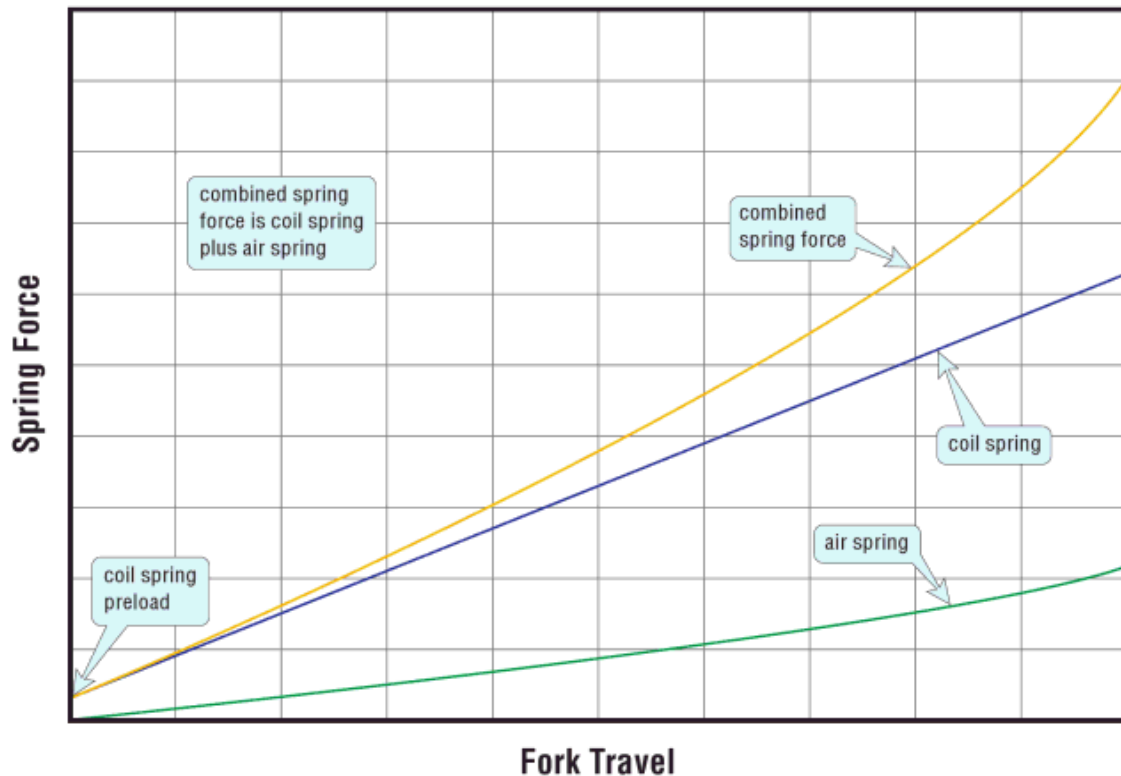


Figura 17. Gráfica fuerza ejercida por el muelle VS movimiento de la horquilla [2]

No es recomendable aumentar la presión del aire de la horquilla ya que conseguiremos aumentar considerablemente la aspereza de nuestro conjunto. Por ello, después de un tiempo prolongado de uso, es preciso purgar las barras sacando el aire sobrante de las mismas para que el comportamiento sea el adecuado.

En cuanto al mantenimiento de las horquillas, distinguiremos entre las necesidades de los pilotos profesionales y de los amateurs; el mantenimiento para éstos últimos es bastante sencillo; basta con observar que los guardapolvos estén en buen estado para que las impurezas no puedan traspasar hacia dentro de la botella, pudiendo rayar la barra y hacer que nuestro sistema comience a perder aceite, disminuyendo así las prestaciones de la horquilla. En cambio, cuando su uso está destinado a la competición, es uno de los elementos más cuidados y revisados debido a su elevada delicadeza y alto grado de importancia en la respuesta del conjunto de la moto. Se observa cautelosamente que no existan irregularidades en las barras debidas a impactos o suciedad en la misma, se cambia el aceite después de cada carrera para que éste no pierda sus prestaciones a causa de la fatiga a la que se encuentra sometido dicho material y se trata de que las barras estén completamente limpias para evitar, como se ha citado anteriormente, que aparezcan marcas en las barras.

2.5.4. Regulación

Veamos un esquema de qué elementos pueden ajustarse:

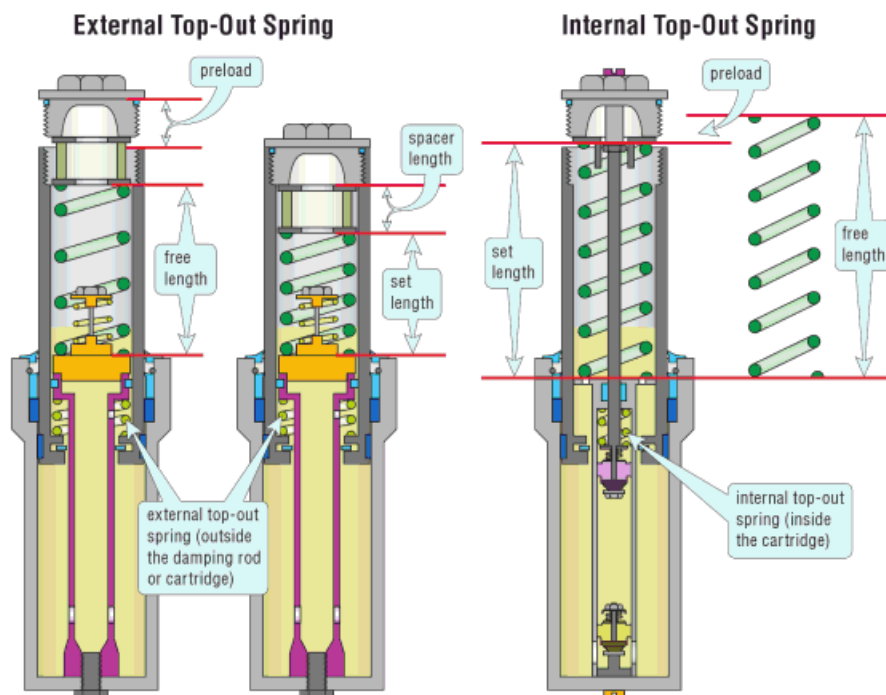


Figura 18. Esquema sobre parámetros ajustables en una horquilla de cartucho [22]

El ajuste de la horquilla puede variar manipulando los siguientes elementos:

- **Rigidez del muelle:** Varía la constante de deformación del muelle. Así, se necesitará más energía para obtener la misma deformación; o lo que es lo mismo, si actuamos sobre él con la misma energía, el desplazamiento del muelle será menor.

Este parámetro depende directamente del peso corporal del piloto. Así, los pilotos que deseen una mejora en su sistema de suspensión, deberán cambiar los muelles originales, preparados para un peso estándar, por unos cuya rigidez se acomoden a él mismo.

- **Precarga del muelle:** Endurece estáticamente el sistema elástico de amortiguación. Al actuar sobre este reglaje, lo que estamos haciendo es introducir o extraer el vástago del alojamiento existente en el interior del muelle, comprimiéndolo.

Algunos modelos tienen la opción de ajustarlo desde el exterior con un tornillo que comprime el muelle interiormente; para aquellas horquillas que no gozan de dicho reglaje exterior, hará falta introducir arandelas para comprimir el muelle.

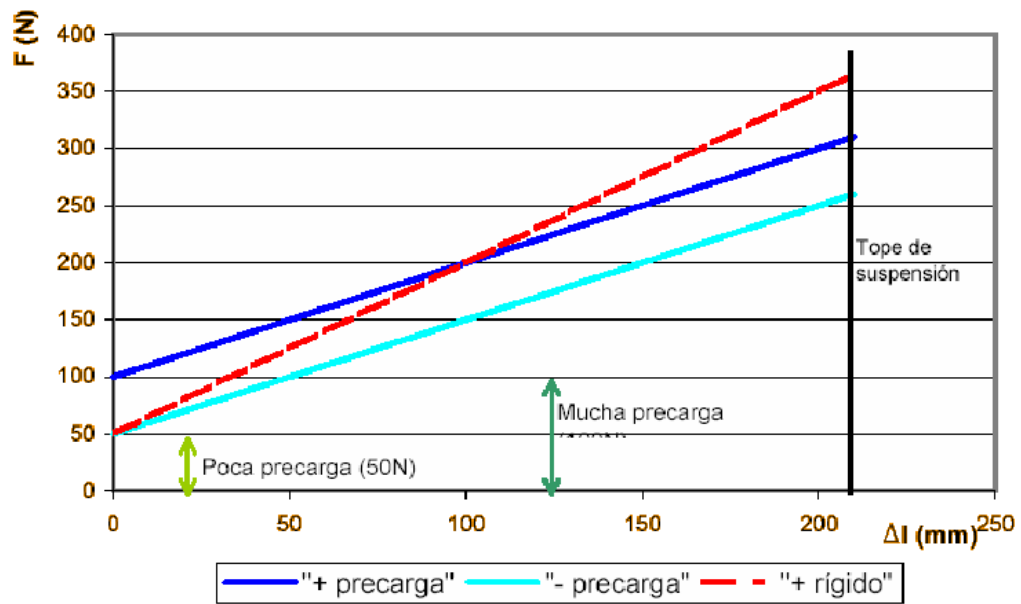


Figura 19. Gráfica comportamiento del muelle según la fuerza aplicada [10]

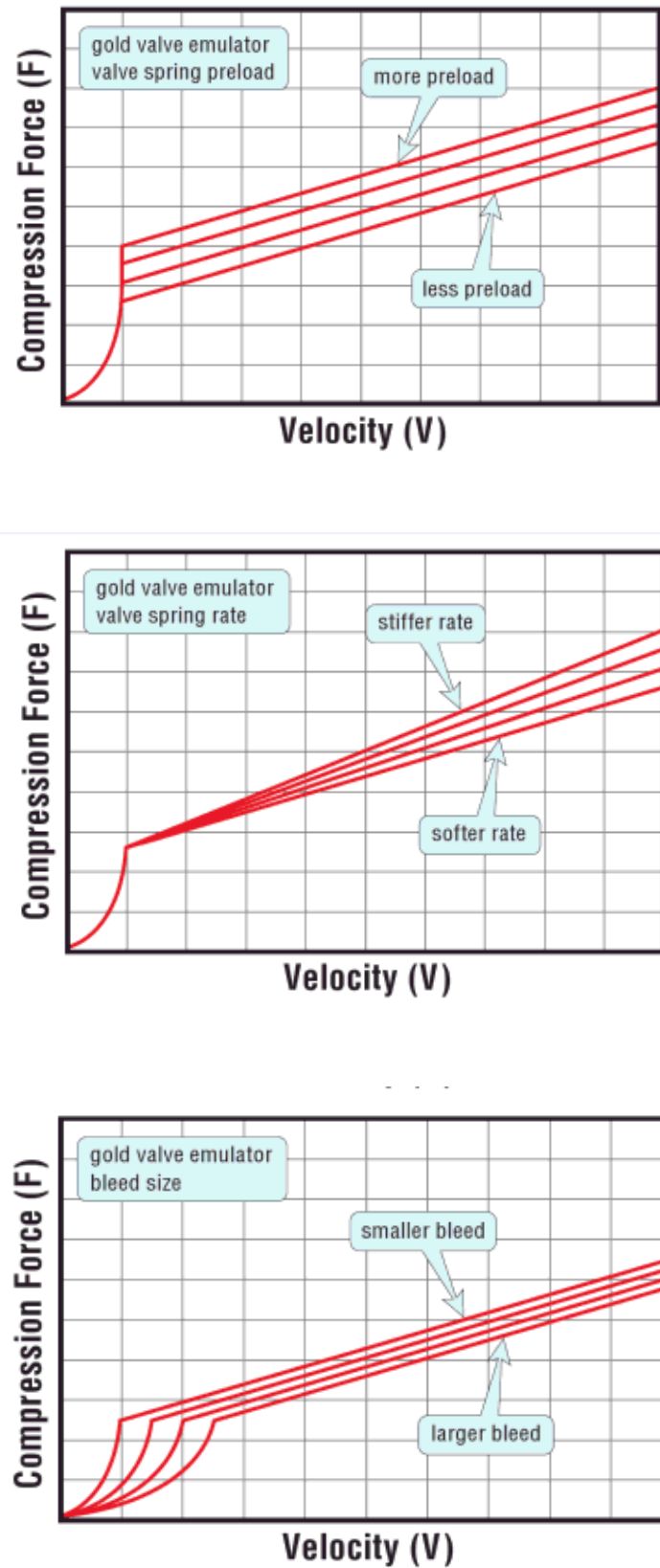


Figura 20. Gráficas de fuerza de compresión VS velocidad con diferentes ajustes de la precarga [22]

Para comprobar que no hace topes ni trabaja con un recorrido excesivamente pequeño, puede instalarse una brida que indique el recorrido estático empleado, el cual debe ser cercano al máximo, pero no completo. En este caso lo único que se puede regular es la precarga inicial, es decir, la carga necesaria para que el resorte comience a comprimirse. Es importante que la suspensión disponga de un cierto hundimiento con el piloto para evitar que las ruedas se levanten a pisar cualquier bache o cambios de rasante, pero la medida varía dependiendo del tipo de moto, de su peso y del que tenga el piloto.



Figura 21. Medición del recorrido estático [6]

También puede hallarse de forma matemática.

Primero, mediremos L1. Sin el piloto la distancia de la horquilla totalmente extendida, desde el reten hasta la tija inferior o si es invertida hasta la parte inferior de la misma.

La segunda medida será L2, esta vez con el piloto encima y en la posición de conducción normal, se comprimirá la horquilla sin usar los frenos; después se deja que la horquilla se extienda lentamente y en el punto donde se pare, se medirá de nuevo la distancia desde el reten hasta la tija inferior o si es invertida hasta el final de la misma.

La última medida la denominaremos L3, en la misma posición en la que tomamos la medida L2, extendemos la horquilla tirando hacia arriba de la misma; donde se pare mediremos la distancia de nuevo desde el reten hasta la tija inferior.

Obtenidas las tres distancias, procederemos a calcular el recorrido estático con la siguiente fórmula:

$$L1 - [(L2 + L3) / 2]$$

- Nivel de aceite: La variación de este parámetro tiene su mayor influencia al final del recorrido de la horquilla. La cantidad de aceite que aloja en su interior es de unos 200,220 cl. (dependiendo del modelo).
- Viscosidad y calidad del aceite: Suele utilizarse SAE 5 o 10 para preparaciones más específicas; sino, SAE 15 o 20, el cual es más denso y vuelve a la horquilla más lenta.
- Amortiguador de compresión: Regula la velocidad con la que se comprimirá la horquilla al aplicarle una fuerza. Ha de lidiar con un rango mucho mayor de velocidades (generadas por las discontinuidades del terreno de diferentes formas y profundidades) que el amortiguador de extensión.

Podremos variarlo mediante el tornillo que encontraremos en la parte superior de la barra.

Cuanta mayor dureza demos a este sistema, más cerraremos el paso del fluido por los orificios y nuestra horquilla trabajará de forma más lenta en el trabajo de compresión.

La amortiguación en compresión es de vital importancia ya que afecta tanto a la tracción como a la sensación de control, la resistencia al final del recorrido (bottoming resistance) y a la comodidad (plushness).

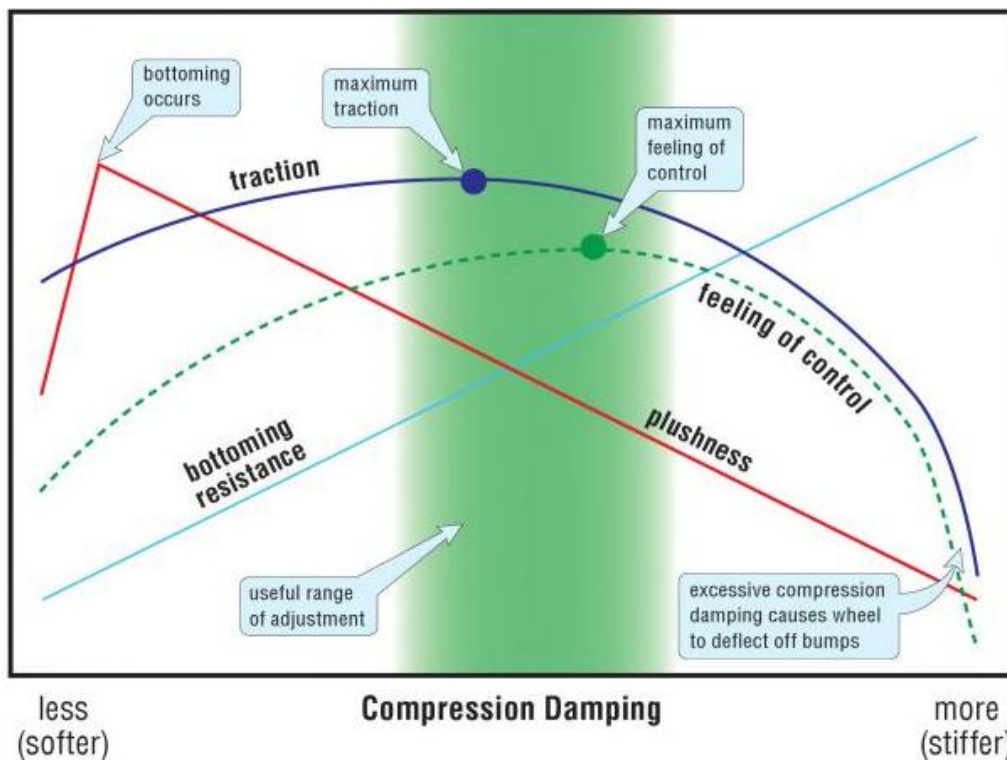


Figura 22. Gráfica sobre la variación de diferentes parámetros con la regulación de la amortiguación de compresión [2]

- Amortiguador de extensión: Regula la velocidad con la que se expandirá la horquilla al cesar la aplicación de la fuerza, es decir, su función primordial es la de controlar la energía de las espiras comprimidas en el momento de absorber las irregularidades. Podremos variarlo mediante el tornillo que encontraremos en la parte inferior de la barra. El comportamiento de extensión está ligado a las pequeñas irregularidades del terreno.

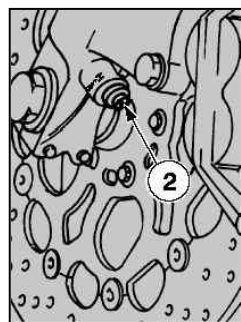


Figura 24. [6]
2: Amortiguador de compresión

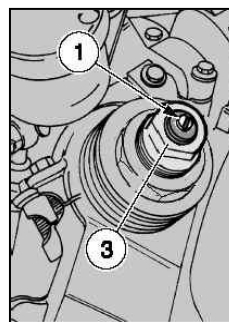


Figura 23. [6]
1: Amortiguador de extensión 3: Precarga del muelle

2.6. Amortiguador

Los amortiguadores funcionan de un modo similar a la horquilla de cartucho. En este caso un émbolo dotado de un pistón con láminas recorre el cilindro. En el recorrido de compresión las láminas de extensión no actúan gracias a un by-pass (válvula de doble paso) mientras que en el de extensión es al contrario, no actúan las láminas de compresión. El principal problema es desalojar el aceite necesario para la entrada del vástago en el recorrido de compresión, que suele realizarse por medio de una cámara de gas a presión separada del aceite por una pared que puede desplazarse o por una membrana. Cuando el vástago entra el aceite presiona el gas que ve reducido el volumen que ocupa, y al salir ocurre el efecto contrario.

2.6.1. Tipos

Hay varios tipos de amortiguadores, con botellas de gas separadas, con botella en el cuerpo, e incluso aquellos que mezclan el gas con el aceite, de manera que la mezcla puede comprimirse directamente en el cilindro principal.



Amortiguador de emulsión sin pistón



Amortiguador Monotubo con pistón interno de alta presión



Amortiguador Monotubo con botella de gas adosada

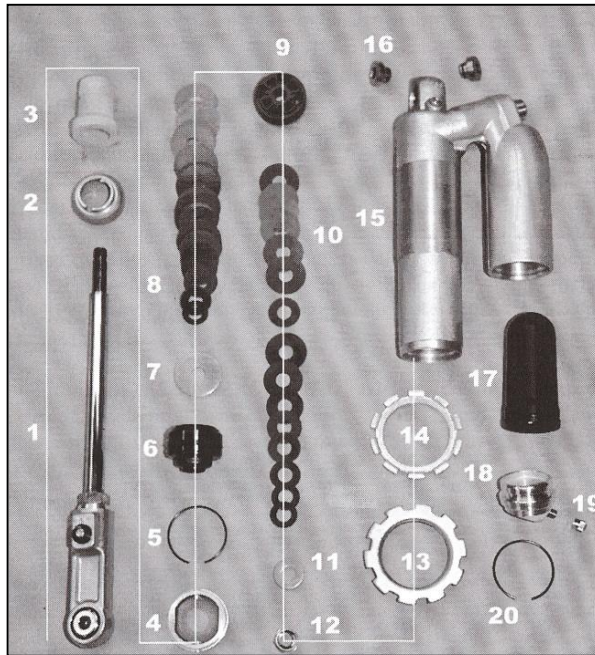


Amortiguador Monotubo con botella de gas separada con latiguillo

Figura 25. Tipos de amortiguadores [26]

2.6.2. Partes

Del mismo modo que hemos desarrollado el apartado en la horquilla, procederemos a ver el despiece de un amortiguador explicando las partes más importantes del mismo.



1. Vástago
2. Asiento para el tope de goma
3. Tope de goma
4. Tapón
5. Clip
6. Centrador guía
7. Arandela
8. Láminas de compresión
9. Pistón
10. Láminas de extensión
11. Arandela
12. Tuerca
13. Tuerca de precarga
14. Contratuerca
15. Cuerpo
16. Arandela
17. Membrana
18. Tapa
19. Tapón de válvula
20. Clip

Figura 26. Despiece de un amortiguador [6]

1. Vástago: Pieza rígida que sirve de guía para el montaje del resto de partes deslizantes del amortiguador. También tiene una perforación y aguja interiores cuya función es la de regular el flujo de aceite que circula por su interior.

8. Láminas de compresión: Paquete de arandelas de acero flexible cuya función consiste en ofrecer resistencia al fluido amortiguador cuando nuestro sistema se comprima. Dicha amortiguación puede variarse añadiendo o retirando unidades del paquete de láminas.

9. Pistón: Pieza cilíndrica con perforaciones a dos niveles en cuyos extremos van asentadas las láminas. Gracias a su geometría no permite que el aceite fluya en ambos sentidos simultáneamente.

10. Láminas de extensión: Paquete de arandelas de acero flexible cuya función consiste en ofrecer resistencia al fluido amortiguador cuando nuestro sistema se expanda. Dicha amortiguación puede variarse añadiendo o retirando unidades del paquete de láminas.

13. Tuerca de precarga: Con ella conseguiremos dar al elemento elástico de nuestro sistema la carga inicial óptima en cada caso.

15. Cuerpo: Habitáculo donde se aloja el aceite usado para la amortiguación del sistema.

17. Membrana: Habitáculo donde se aloja el gas (nitrógeno) usado para la amortiguación del sistema.

Se separa el gas del aceite puesto que juntos, se formarían burbujas, no obteniendo así el comportamiento deseado en nuestra suspensión.

3.6.3 Funcionamiento

- Recorrido de compresión

El vástago se comprime en el interior de cuerpo del amortiguador haciendo que el aceite carezca del espacio necesario en la zona inferior del cuerpo y tenga que circular hacia arriba, pasando por las láminas de compresión y el pistón hacia la punta opuesta del vástago.

El aceite es un fluido incompresible, por tanto, la cámara que contiene el nitrógeno, se comprime para ceder así el volumen que el aceite y el vástago necesitan.

- Recorrido de extensión

El vástago se extiende en el interior de cuerpo del amortiguador haciendo que el aceite regrese a su posición inicial gracias a la presión que el nitrógeno ejerce; por tanto, el aceite ha de circular hacia abajo, pasando por las láminas de extensión y el pistón hacia la punta opuesta del vástago.

2.6.3. Regulación

El ajuste de la horquilla puede variar manipulando los siguientes elementos:

- Tipo de muelle: Pudiendo ser *lineal*, Muelles convencionales cilíndricos de coeficiente lineal, o *progresivo*, el coeficiente de elasticidad del muelle va variando a lo largo de su recorrido. Estos últimos son los menos utilizados.



Figura 27. Muelle lineal [23]

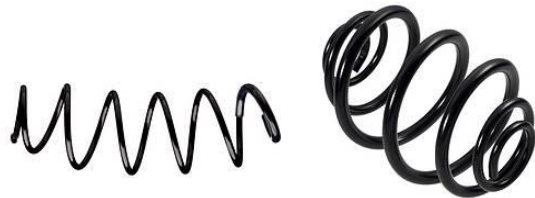


Figura 28. Muelles progresivos [23]

- Dureza del muelle: Con el amortiguador en frío situamos la moto sobre un banco (la llanta trasera elevada sobre el suelo), y medimos la distancia A (fig. 29) desde el eje de la rueda hasta un punto concreto del bastidor (en vertical). A continuación haremos la medición B (fig. 30) de igual modo que el anterior proceso pero con la rueda de la moto en contacto con el suelo.

Con la diferencia entre las medidas A y B obtendremos la compresión estática, la cual debe estar entre los 15 y los 25 mm.

Por último, tomaremos la distancia C (fig. 31) como hemos hecho con las dos medidas anteriores pero, esta vez, con el piloto en posición de pilotaje.

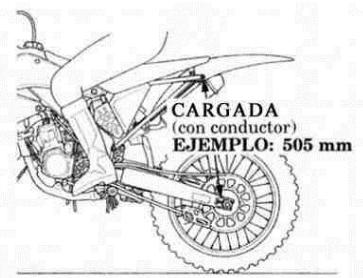


Figura 29. Medida A [10]

Obtendremos la *compresión total* con la diferencia entre la medida A y la C, cuyo valor ha de estar entre 90 y 100 mm.

- Precarga del muelle: Existen dos maneras diferentes de cambiar la precarga: con el amortiguador montado o desmontado.

Cuando el amortiguador se encuentra *montado* en la motocicleta, aflojaremos la contratuerca y posteriormente la tuerca, contando con que cada vuelta de tuerca equivale a 1,5 mm de precarga. Una vez obtenida la precarga óptima, la cual no debería distar demasiado de la medida estándar, apretaremos la contratuerca para asegurar el sistema.

Si regulamos la precarga con el amortiguador *desmontado*, llevaremos a cabo el mismo proceso que anteriormente se detalla asegurando primero el amortiguador en un tornillo de banco.

- Presión de nitrógeno: El nitrógeno hace de parte compresible del sistema, para que el aceite tenga el volumen necesario para circular cuando el vástago se comprima. Cuanta más presión demos a este gas, más duro trabajará nuestro amortiguador a compresión y más rápidamente se expandirá.

- Nivel de aceite: La cantidad de aceite que aloja en su interior es de unos 450 cl. (dependiendo del modelo).

- Viscosidad del aceite: Suele utilizarse SAE 5 o 10 para preparaciones más específicas; sino, SAE 15 o 20, el cual es más denso y vuelve al amortiguador más lento.

- Amortiguador de compresión: Regula la velocidad con la que se comprimirá el amortiguador al aplicarle una fuerza.

Podremos variarlo mediante el tornillo que encontraremos en la parte superior de la botella.

Cuanta mayor dureza demos a este sistema, más cerraremos el paso del fluido por las láminas y nuestro amortiguador trabajará de forma más lenta en el trabajo de compresión.

- Amortiguador de extensión: Regula la velocidad con la que se expandirá el amortiguador al cesar la aplicación de la fuerza. Podremos variarlo mediante el tornillo que encontraremos en la parte inferior de la botella. El comportamiento de extensión está ligado a las pequeñas irregularidades del terreno, haciendo que la motocicleta pierda tracción y con ella, potencia.

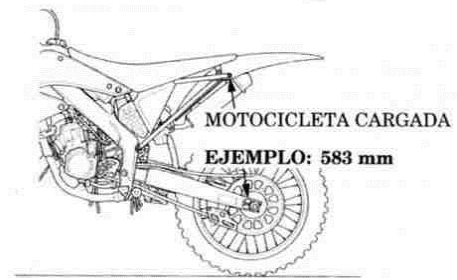


Figura 30. Medida B [10]



Figura 31. Medida C [10]

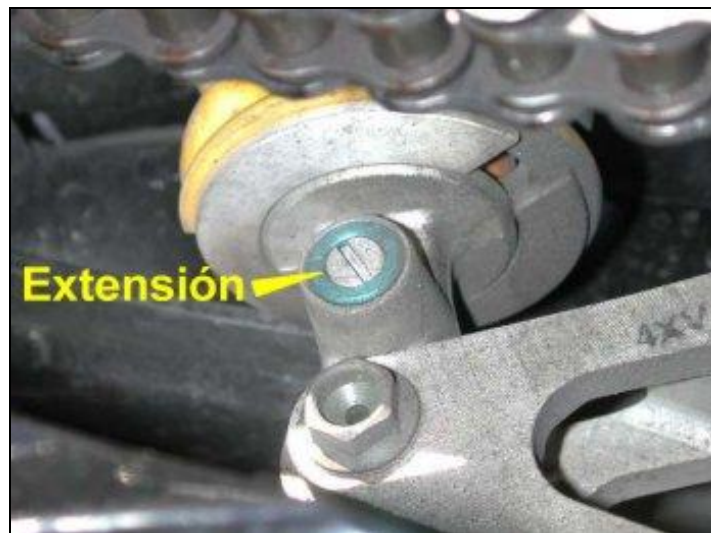


Figura 32. Tornillos de ajuste del amortiguador

2.7. Amortiguador de dirección

Existe otro tipo de amortiguador menos conocido; el amortiguador de dirección. Este dispositivo consiste en variar la rigidez de la dirección evitando el shimi de la misma, es decir, su movimiento lateral.

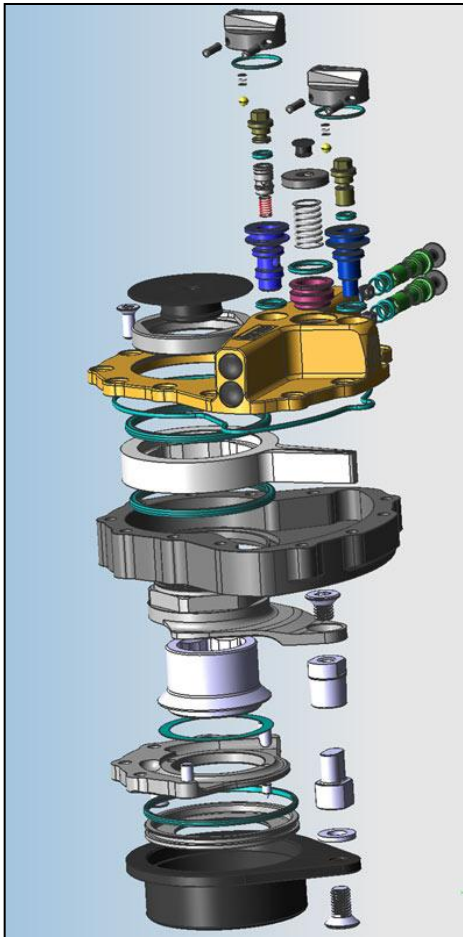


Figura 35. Despiece de un amortiguador de dirección [21]



Figura 33. Amortiguador de dirección off-road [21]



Figura 34. Amortiguador de dirección carretera [21]

2.8. Manillar con amortiguación integrada

Este manillar está diseñado para minimizar los problemas de fatiga en el piloto, sobre todo en los antebrazos. Su objetivo no es solo absorber vibraciones (una vibración no tiene más de 3mm); es absorber impactos, con 50mm de recorrido, de enorme fuerza en direcciones donde la horquilla no actúa.

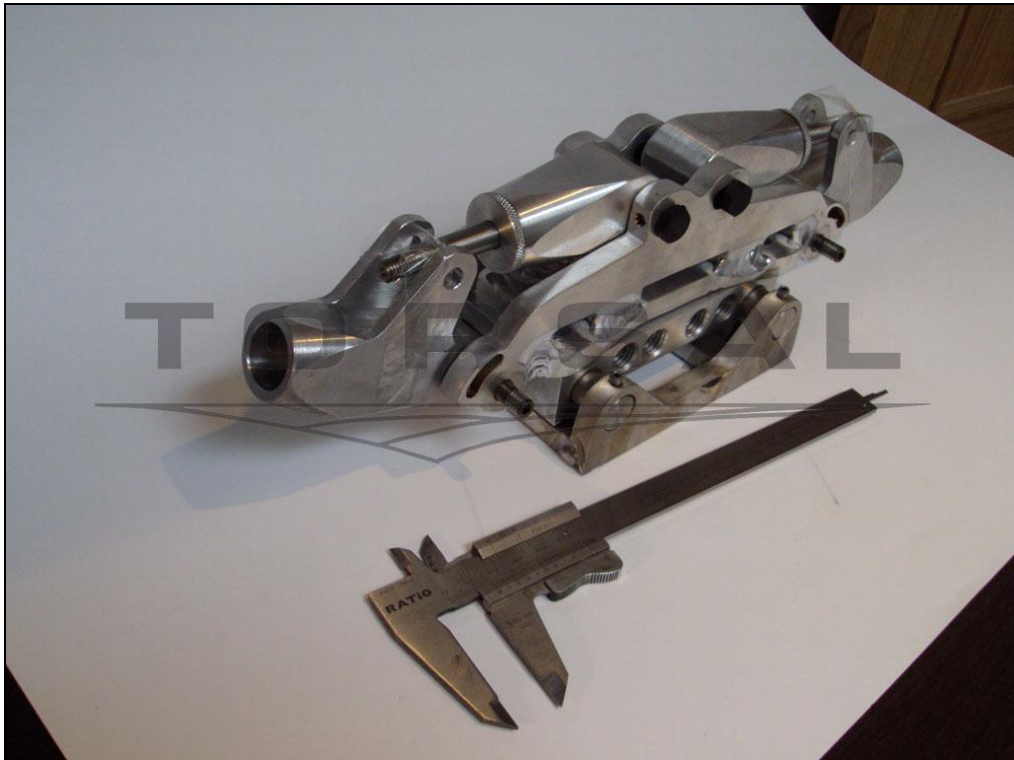


Figura 36. Manillar con suspensión integrada (imagen cedida por Torsal S.L.) [27]

Su estructura se compone de varias modificaciones. Primeramente se instala una placa de aluminio de 12mm sobre las torretas de la tija; esta placa se sujeta en el centro con un eje de gran diámetro, unos 30mm. En dicho eje se fijan, con rodamientos para dotarlo de libertad en cuanto a giro se refiere, dos piezas rectangulares mecanizadas en aluminio, cada una de ellas ubicada a cada lado.

A estas piezas se unen los semi-manillares con los amortiguadores previamente montados, los cuales portan un vástago de 12mm de guía y funcionan únicamente con muelles, uno de compresión y otro de extensión.

En este caso sólo se utilizan muelles puesto que cada semi-manillar tiene movimiento en los ejes X e Y; es decir, se necesitan 4 muelles por semi-manillar. Intentar hacerlo con un sistema hidráulico sería muy costoso y pesado, además de difícil de regular. La amortiguación con la que cuenta el manillar es vertical y frontal.

Amortiguación vertical:

- Las horquillas de una motocicleta de motocross están reguladas para absorber un máximo de 550 Kg.
- El problema es que los baches inferiores a 25 Kg. son absorbidos muy mal por la horquilla y parte del movimiento que genera el bache no es absorbido por la horquilla, lo absorbe el brazo del piloto.
- Los baches inferiores a 4 Kg. no son absorbidos por la horquilla y son absorbidos directamente por los brazos del piloto.
- Hay que tener en cuenta que en una pista de enduro o MotoCross el 80% de los baches son de fuerzas inferiores a 25 Kg. Y estos no son absorbidos por la horquilla. Esto provoca antes la fatiga de los brazos y del piloto en general.
- El manillar Torsal cuenta con unos amortiguadores de movimiento vertical, independientes para cada mano y muy sensibles, que absorben las vibraciones y pequeños baches. Estos amortiguadores son regulables y aportan 5 cm. extra de suspensión.

Amortiguación frontal:

- La horquilla de una motocicleta está colocada a 22º del suelo y absorbe en funcionamiento la gran mayoría de baches que le llegan.
- Cuando se practica motocross o enduro estos baches no siempre llegan con este ángulo. Estos baches pueden llegar desde 15º hasta 30º.
- Esto provoca fuertes sacudidas frontales que el piloto debe resistir con sus brazos, provocando una prematura fatiga en espalda y tríceps.
- Un ejemplo es cuando golpeamos en funcionamiento un bordillo y el manillar nos da una sacudida hacia atrás. Esto provoca un vector de fuerza demasiado inclinado que la horquilla no absorbe y se transmite en una fuerza horizontal sobre la motocicleta
- La amortiguación frontal del manillar absorbe estas fuerzas de un modo muy suave. Pudiéndose regular desde casi rígido a muy blando con 5,5cm frontales y 5,5cm hacia atrás.



Figura 37. Manillar con suspensión integrada (imagen cedida por Torsal S.L.) [27]

3. Conceptos mecánicos aplicables al proyecto

Antes de comenzar con el desarrollo del proyecto, hemos de tener claros los conceptos ingenieriles asociados al diseño y construcción de una motocicleta. En este apartado aclararemos algunos de los más importantes que van a ser utilizados a posteriori en el diseño del basculante.

3.1. Esfuerzo

Un esfuerzo son las fuerzas internas que aparecen en una estructura debido a la aplicación de una carga. Dichas cargas pueden ser estáticas, las cuales se aplican gradualmente desde un valor inicial cero hasta su máximo valor; o dinámicas, las cuales se aplican a una velocidad determinada. Estas últimas se dividen a su vez en: carga súbita, cuando el valor máximo se aplica instantáneamente; carga de choque libre, cuando está producida por la caída de un cuerpo sobre un elemento resistente y carga de choque forzado, cuando una fuerza obliga a dos masas que han colisionado a seguir deformándose después del choque.

Dependiendo de la dirección relativa que tenga el esfuerzo ejercido en la pieza con la superficie de la misma tenemos varios tipos de esfuerzos: tracción, compresión, cortadura, flexión y torsión. Para nuestro estudio, los más relevantes serán los esfuerzos tanto de flexión como de torsión, ya que serán los que transmitan al piloto estabilidad y seguridad.

3.2. Resistencia

La resistencia de un elemento se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin que la pieza sufra fallo estructural alguno; es decir, romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

Existen varios tipos de resistencia: a tracción, a compresión, a flexión, a cortadura y a torsión.

3.3. Rigidez

Capacidad de un objeto sólido o elemento estructural para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos; es decir, es la relación entre la carga aplicada y la deformación que produce. Quedará definida mediante el Modulo de Young, que es la tensión aplicada dividida por la deformación unitaria resultante.

3.4. Tensión y deformación

Aplicando los dos conceptos anteriores a una pieza y cuantificándolos, proporcionan una forma de comparar diferentes materiales. Estas magnitudes vienen dadas por campos tensoriales definidos sobre dominios tridimensionales. Para medir resistencia, utilizamos la tensión. La tensión es equivalente a la medida de la densidad de fuerza que existe en un material. Se expresa como la fuerza aplicada por unidad de sección transversal del material.

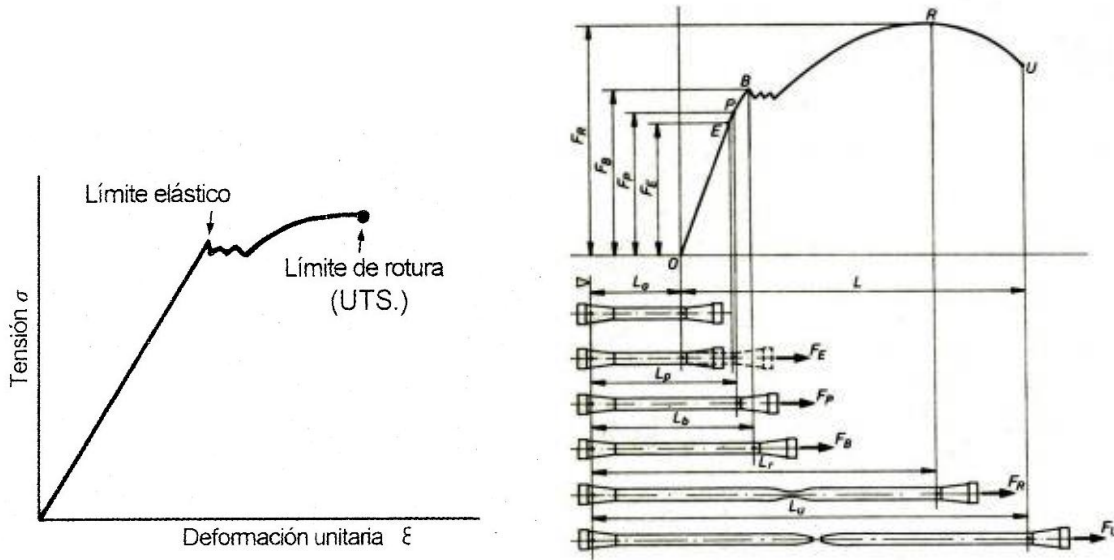


Figura 38. Diagrama tensión – deformación [12]

Bajo carga, todos los materiales se deforman. Esta deformación se llama alargamiento unitario y expresa la variación proporcional de las dimensiones. Los dos parámetros más importantes en la medición de la resistencia de los materiales son: la tensión de rotura y el límite elástico.

Para determinar los valores característicos de un material y su comportamiento frente a esfuerzos, este será sometido a un ensayo donde se recogerán los valores que lo caracterizan. Uno de los ensayos más frecuentes es el ensayo de tracción. Se realiza con probetas de dimensiones normalizadas, que se someten a esfuerzos de tracción progresivamente crecientes, en dirección longitudinal, hasta producir su rotura.

El ensayo de tracción permite estudiar el alargamiento de la probeta en función de la fuerza o carga actuante. La forma del diagrama depende del material a ensayar. En la fig. 38 podemos ver un diagrama característico (fuerza – elongación) de un material dúctil y maleable, como el acero extrasuave.

A continuación indicaremos los estados y puntos más relevantes diagrama:

Alargamientos:

- *Elásticos*. Los alargamientos son pequeños y proporcionales a los esfuerzos. Cuando el esfuerzo cesa la probeta recupera su estado inicial. ZONA ELÁSTICA.
- *Permanentes*. Los alargamientos son grandes, cuando cesa la fuerza, la deformación permanece. ZONA PLÁSTICA.
- *Localizados*. Cuando la carga llega a cierto valor, el alargamiento se localiza en una zona concreta (hacia el centro de la probeta) llamada ZONA DE ESTRICCIÓN. Finaliza en rotura.

Puntos y conceptos:

- *Límite de elasticidad (E)*. Es la máxima tensión que se puede producirse sin que haya deformación permanente.
- *Límite de proporcionalidad (P)*. Es la máxima tensión que se puede producir en la zona donde la tensión es una función lineal. Suele coincidir con el anterior.
- *Límite de fluencia (B)*, también llamado límite aparente de elasticidad. Es una medida arbitraria tomada por acuerdo internacional. Surge a partir del punto donde se produce una deformación de 0,2%.
- *Carga de rotura (R)* o límite de rotura. Es la carga máxima por unidad de sección que resiste el material antes de romperse.
- *Rotura efectiva (U)*. Punto donde rompe la probeta.
- *Alargamiento de rotura*. Es el alargamiento que sufre el material antes de romperse.
- *Estricción*. Es la reducción de la sección que sufre la probeta en la zona de rotura. El alargamiento y la estricción se usan para ver el grado de ductibilidad de los materiales.

3.5. Ductilidad y fragilidad

La ductilidad determina el tipo de rotura que sufre el material. Así pues, un material dúctil será aquel que sufra una gran deformación antes de romperse; si por el contrario se rompe repentinamente, con muy poca deformación previa, entonces es frágil.

Si es posible, seleccionaremos un material dúctil ya que puede soportar cierto nivel de sobrecarga sin llegar a romperse totalmente, pero estos materiales suelen tener una resistencia acotada ya que, normalmente, conforme aumenta la resistencia de los materiales, también suele aumentar su fragilidad. Por lo tanto, deberemos sacrificar una de las propiedades de dicho material dependiendo del uso que vaya a darse y a las cargas a las que va a ser sometido, dando prioridad así a una u otra característica.

Generalmente, las piezas de metal fundido son menos dúctiles que las forjadas o aquellas que están hechas partiendo del material en bloque o en barra.

3.6. Densidad

La densidad mide la masa por unidad de volumen. Esta propiedad nos servirá para comparar las masas de distintos materiales. Ante las mismas características, elegiremos pues el material con menor densidad posible, ya que así disminuiríamos el peso de nuestra motocicleta.

3.7. Amortiguación

3.7.1. Introducción

Un amortiguador es simplemente un disipador de energía, el movimiento del amortiguador produce resistencia mecánica, pero al contrario que un muelle, no tiene una tendencia natural a volver a su posición inicial, y por lo tanto absorbe trabajo o energía, que finalmente es disipada en forma de calor. Esta pérdida de energía es necesaria para evitar movimientos incontrolados de la suspensión. Dicha energía se disipa sobretodo en forma de calor, por ello, cuando las suspensiones lleven cierto tiempo trabajando, se sobrecalentarán, de forma que variará la capacidad de amortiguación del aceite; para compensar este efecto hay varias soluciones, como un absorbedora de energía, cualquier amortiguador debería ajustarse para la cantidad de energía que tenga que disipar, el cual depende de factores como el muelle, la masa de la moto o el tipo de uso requerido.

3.7.2. Tipos de amortiguamiento

Existen varios tipos de amortiguamiento: viscoso puro, hidrodinámico puro y real.

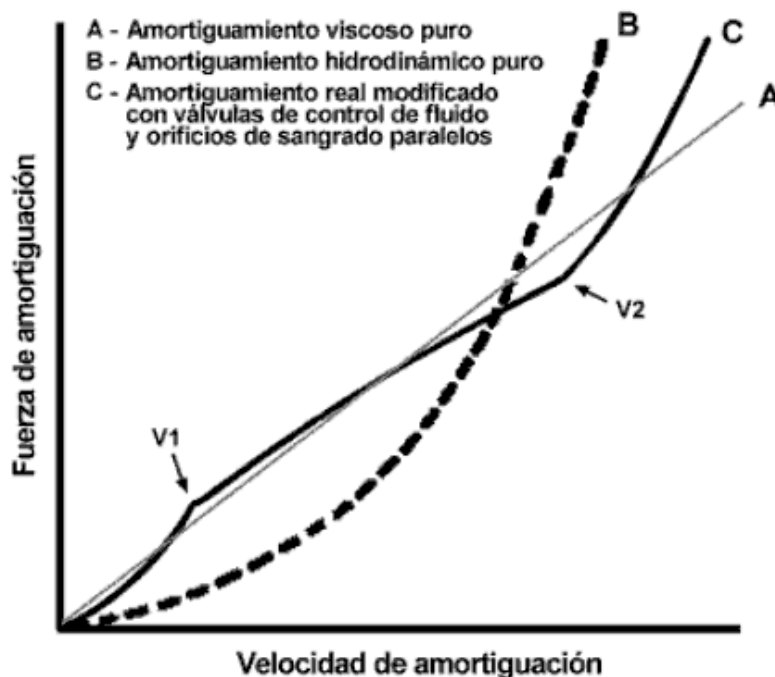


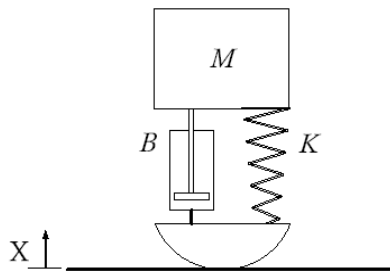
Figura 39. Gráfica de los tipos de amortiguación [12]

Procedamos a explicar cada uno de ellos.

- a) Amortiguamiento viscoso puro: es directamente proporcional a la velocidad del amortiguador.
- b) Amortiguamiento hidrodinámico puro: aumenta según el cuadrado de la velocidad. Existe una ínfima amortiguación a velocidades bajas combinada con una resistencia excesiva a velocidades elevadas.
- c) Amortiguamiento real: trata de aproximarse lo máximo posible al amortiguamiento viscoso puro. Desde 0 hasta la velocidad V_1 , las válvulas de control de flujo están cerradas y la fuerza de amortiguación se debe al flujo que pasa a través de los orificios paralelos. La región entre los puntos V_1 y V_2 , está controlada por las válvulas de flujo; y a partir de la velocidad V_2 , estas válvulas se abren completamente por lo que la forma vuelve a ser parecida al caso hidrodinámico puro.

3.8. Bases en el cálculo de los parámetros de amortiguación

Simplificando el conjunto a estudiar, podemos considerar cada uno de los amortiguadores como un conjunto masa-muelle como el de la figura 40; donde M es la mitad de la masa del conjunto moto-piloto, K la constante elástica del muelle y B la viscosidad del amortiguados.



Para estudiar el comportamiento de nuestro sistema frente a una irregularidad en el terreno, tomaremos el cero del sistema de referencia de la figura como la posición del suelo $x_s(t)$ y la de la masa suspendida de la moto por $x_m(t)$. Aplicamos la segunda ecuación de Newton, obtenemos:

Figura 40. Esquema simplificado de un sistema de suspensión [13]

$$M\ddot{x}_m(t) = -B(\dot{x}_m(t) - \dot{x}_s(t)) - K(x_m(t) - x_s(t)) + Mg$$

Dado que la ecuación no es lineal, debemos linealizarla en torno a puntos conocidos, como son $x_s^0 = 0$ y $x_m^0 = \frac{Mg}{K}$.

La transformada de Laplace de la ecuación queda:

$$Ms^2 x_m(s) = -Bs(x_m(s) - x_s(s)) - K(x_m(s) - x_s(s))$$

Y la función de transferencia:

$$\frac{X_m(s)}{X_s(s)} = \frac{Bs + K}{Ms^2 + Bs + K}$$

3.9. Análisis de la función de transferencia

3.9.1. Posición de polos y ceros

Nuestro sistema es estable y tiende a un régimen permanente, es decir, a mantener la distancia entre el terreno y la masa suspendida de la moto.

Este sistema tiene un cero en $s = -K/B$ y dos polos, que son complejos si el término $B^2 - 4MK < 0$ y son reales en otro caso; es decir: los valores de B y K modifican la posición de los polos y ceros del sistema y, por tanto, su comportamiento dinámico.

3.9.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

Si analizamos el sistema en el dominio de la frecuencia, se observa que el cero aporta pendiente de $+20\text{dB/dec}$ para frecuencias superiores a K/B rad/s.

Los polos, cuando son complejos conjugados, aportan una pendiente de -40dB/dec para frecuencias superiores a $\omega_n = \sqrt{K/M}$ rad/s y si son reales aportan pendientes de -20dB/dec cada uno para frecuencias superiores a sus respectivos valores en radianes por segundo.

De esto se deduce que la dureza del muelle afecta directamente al ancho de banda del sistema resultante: los valores elevados de K aumentan el ancho de banda del sistema, con lo que se filtraría menos las altas frecuencias. Sin embargo hay que destacar que también el valor de B modifica el ancho de banda, lo que dificulta el análisis en conjunto.

Existen cuatro parámetros principales que afectan al comportamiento de la suspensión:

- Muelles
- Amortiguamiento
- Masa suspendida y no suspendida
- Las características del neumático

3.10. Muelles

3.10.1. Introducción

Para nuestros propósitos la característica más importante de un muelle es su constante elástica, la cual es la medida de su rigidez y se determina midiendo la fuerza extra necesaria para comprimir (o extender en algunos casos) el muelle una pequeña distancia dada. Esta medida suele expresarse en N/mm.

En algunos casos esta constante no varía a lo largo del recorrido útil del muelle, entonces podemos decir que la constante es lineal. Por otro lado, existe otro tipo de muelles cuya constante es progresiva y normalmente en el uso que se le da a los muelles en las motos, esta progresión suele ser positiva, esto es, la constante aumenta al aumentar la carga.

Hay que diferenciar entre constante y carga. La carga es la fuerza total que soporta el muelle mientras que la constante es la fuerza adicional necesaria para comprimir el muelle una cantidad extra dada.

3.10.2. Materiales y disposiciones

Los muelles pueden tener formas muy diversas y se pueden fabricar con muchos materiales diferentes, pero en la práctica sólo se usan unos pocos muy concretos.

El más utilizado es el *acero*, pero también resulta muy eficiente el *titanio*, ya que, con la mitad de peso, ofrece el doble de flexibilidad que el de acero; la única desventaja es su precio, el cual hace que su uso quede restringido a los amortiguadores de competición.

La *goma* tiene muchas propiedades que la convierten en un material muy interesante para usarla como podemos observar en la fig. 41 a modo de muelle; no para fabricarlo directamente, sino con un diseño apropiado.

Gracias a su propia naturaleza, este material consigue darnos una constante elástica progresiva, y también proporciona un cierto grado de amortiguamiento, aunque puede dar problemas debido a la generación de calor si lo utilizamos en terrenos muy abruptos.



Figura 41. Uso de la goma en una horquilla (Greeves) [10]

La goma es un material muy versátil y sus características pueden variarse para satisfacer diversos requerimientos, cambiando simplemente la composición o el diseño mecánico.

Una forma de emplearlo es (como hizo Greeves) situándolo sobre uno de los cojinetes que sustentan la horquilla delantera. En este caso la goma trabaja a cortadura, ya que todo el cojinete se encuentra sometido a torsión.

En algunas horquillas telescópicas Hagon, eran bandas de goma las que hacían la función de muelle. Esto proporcionaba un ajuste muy sencillo, pudiendo modificar el mismo añadiendo o quitando bandas conforme fuera necesario.

Hemos de mencionar el *gas* (fig. 42) como material amortiguador, el cual produce de forma automática una constante progresiva. La carga que soporta un muelle neumático depende de su presión interna, que a su vez depende de la presión estática inicial y del volumen interno. Aplicando la ley de Boyle, sabemos que esta presión es inversamente proporcional al volumen, es decir, si el volumen interno se reduce a la mitad, la presión será el doble y la unidad estará soportando dos veces la carga inicial. La magnitud de progresión de la constante viene dada por la relación de compresión del sistema.

Además de su progresividad, los muelles neumáticos tienen la ventaja de su fácil ajuste. La precarga dependerá de un muelle helicoidal, no teniendo ningún efecto el gas sobre dicho muelle.

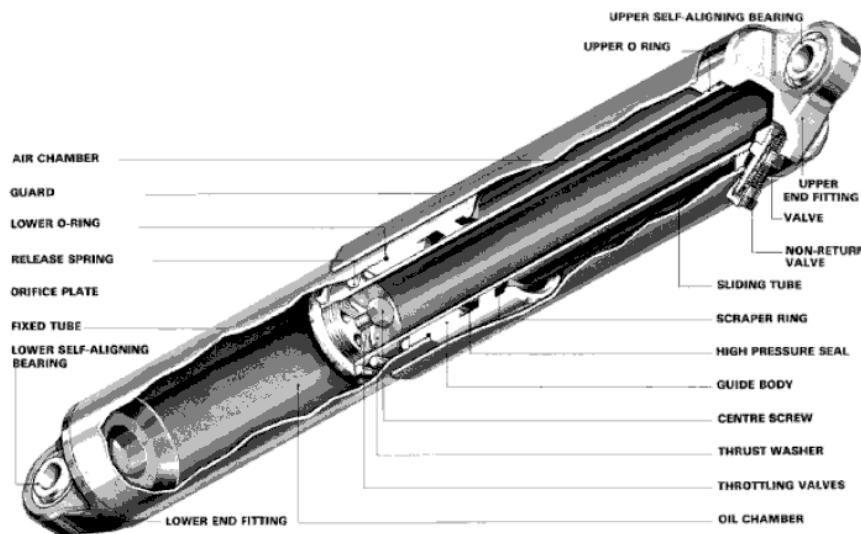


Figura 42. Sistema de suspensión Fournales de gas [1]

De forma ocasional se ha probado la utilización de *ballestas* o *barras de torsión* (normalmente en acero), pero no se ha impuesto por varios motivos, aunque en determinadas aplicaciones las barras de torsión pueden suponer un ahorro considerable de espacio y posean menos cargas a flexión y concentraciones de tensiones debido a que un muelle helicoidal no deja de ser una barra de torsión enrollada con forma de hélice. Las ballestas, aunque no metálicas, han sido utilizadas en automóviles. Los materiales modernos ofrecen nuevas posibilidades a este tipo de muelles, aunque requieren unos mayores controles de calidad.

Yamaha y Öhlins patentaron un muelle de fibra de vidrio, cuya morfología podemos ver en la fig. 43, alojado en el interior del basculante. Es un diseño muy adecuado, ya que permite variar un gran número de parámetros con unos ajustes muy simples.

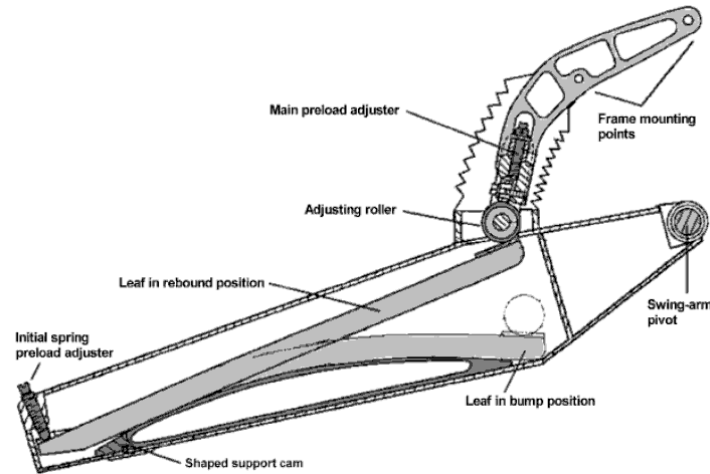


Figura 43. Sistema de suspensión patentado por Yamaha y Öhlins con piezas de fibra de vidrio [1]

Este sistema consiste en una ballesta que se aloja en el interior del basculante. Conforme éste va elevándose, el rodillo actuador fuerza a la ballesta a doblarse sobre la leva de apoyo. El perfil de esta leva estática de apoyo controla la longitud activa del muelle y por lo tanto la constante elástica a lo largo del recorrido.

El ajuste inicial de la precarga determina la posición inicial del muelle sobre la leva de apoyo que tiene una forma especial, y por lo tanto, proporciona cierto control sobre la constante elástica inicial del muelle.

La estructura de soporte del rodillo actuador se puede ajustar hacia delante y hacia atrás para controlar la constante del muelle.

El ajuste de la precarga principal controla la altura estática de la moto de la misma forma que en un sistema normal.

La forma de la leva de apoyo controla la longitud libre del muelle conforme la suspensión se comprime, por lo que también controla la progresividad de la constante de la suspensión. Se pueden conseguir distintos grados de progresividad cambiando dicha leva.

3.10.3. Muelles helicoidales

Los muelles helicoidales de acero son los más comunes y los que vamos a utilizar para el cálculo de nuestra suspensión.

Puede tener un paso fijo, lo que proporciona una constante elástica, o pueden estar hechos con un paso variable, lo que proporciona una constante progresiva. Si utilizamos esta última disposición, hemos de tener en cuenta que conforme el muelle se va comprimiendo, las espiras más cercanas irán haciendo tope unas con otras actuando como si fueran una masa sólida, de forma que la constante del muelle irá aumentando.

Para obtener muelles de paso variable podemos:

- Usar muelles que tengan la misma constante pero pasos distintos, de forma que el que tenga un paso menor quedará comprimido a tope antes.
- Usando muelles con constantes elásticas diferentes, de forma que el más blando quedara comprimido a tope antes que los demás.

3.10.4. Cálculo del parámetro K

Procedamos al cálculo de la constante elástica del muelle de nuestra horquilla; este será un muelle helicoidal de acero.

El comportamiento deseable para la suspensión indica que deben de filtrarse lo más posible altas frecuencias, haciendo que la suspensión trabaje en todo el recorrido posible pero sin dejar el muelle demasiado blando para que no se alcancen los topes (zona no lineal del sistema).

Esto nos fija un valor de K adecuado dependiendo del peso del conjunto moto-piloto. Podemos deducir este valor del siguiente modo:

$$K = Mg / \delta$$

Teniendo como parámetros:

δ el valor deseado de desplazamiento de la horquilla

Masa del piloto = 65 Kg

Masa de la moto (YZF 250) = 102 Kg

Masa total = 167 Kg

Masa que soporta cada rueda (aprox) = $167/2 = 83,5$ Kg

3.10.5. Cálculo de la geometría del muelle

Con la constante de rigidez fijada, podremos hallar la geometría de muelle que nos proporcionará el comportamiento deseado.

Utilizaremos la expresión:

$$K = \frac{d^4 G}{8D^3 N}$$

{

d: diámetro del hilo

G: módulo de rigidez

D: diámetro medio de la espira

N: número de espiras útiles

Como el diámetro del hilo es directamente proporcional a la rigidez, cuanto mayor sea dicho diámetro, más dureza tendrá nuestra horquilla; y siendo el número de espiras inversamente proporcional a K, cuánto mayor sea su número, más suave será el comportamiento del sistema.

Combinando ambos parámetros, podemos obtener infinidad de disposiciones; es más, diseñando un muelle con un hilo de gran diámetro y muchas espiras y otro con un diámetro de hilo pequeño y pocas espiras, obtendremos la misma dureza.

Desde el punto de vista práctico, el segundo diseño será el óptimo ya que, teniendo el mismo comportamiento, será más ligero y nuestra horquilla gozará de mayor recorrido.

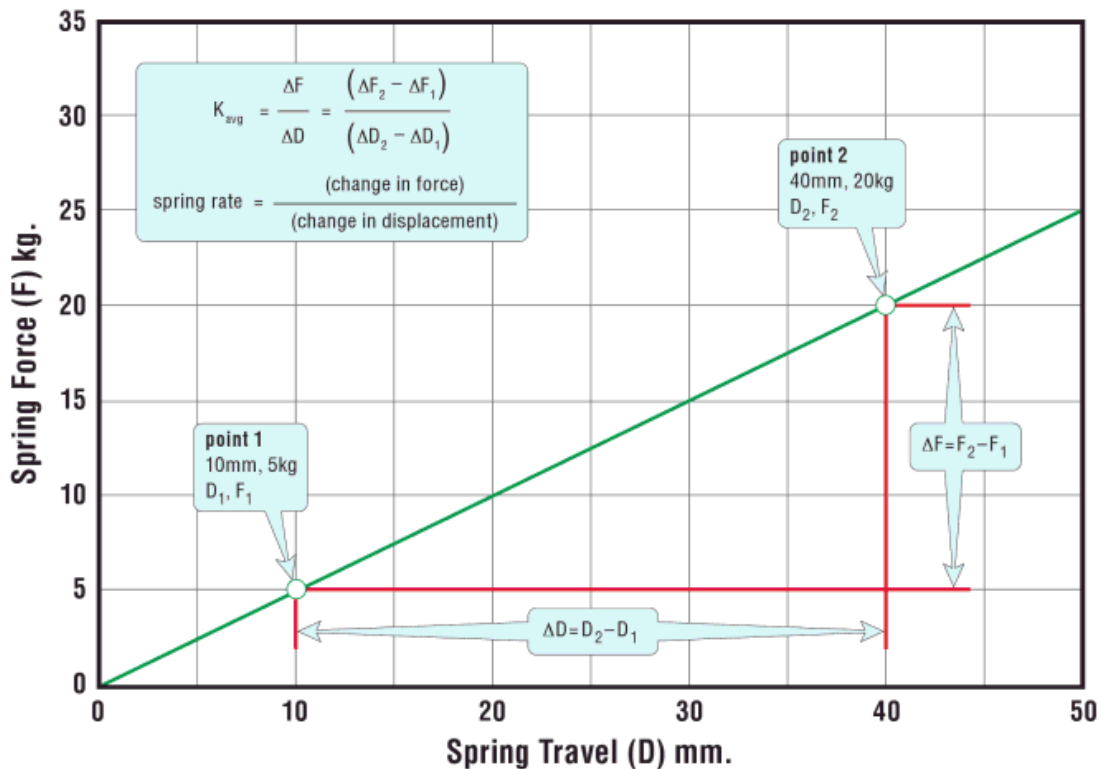


Figura 44. Diagrama fuerza del muelle VS compresión del muelle [2]

3.11. Materiales

Antes de tomar la decisión sobre el material a elegir para la construcción tanto del basculante como el chasis, estudiamos las características de los más utilizados.

3.11.1. Aluminio

El aluminio se ha utilizado a menudo para construir prototipos y máquinas de carreras debido a su ligereza, pero cabe recordar que las características de fatiga del aluminio hacen que sea inevitable la rotura en componentes sujetos a tensiones inversas, por lo que se debe aceptar que estos componentes tendrán una vida limitada.

En nuestros diseños, debido a la necesidad de soldar la estructura tubular, existe un contra añadido; la soldadura de aluminio es algo dificultosa, ya que debe hacerse con un equipo de soldadura eléctrica cuyo arco este protegido en un medio de gas inerte, debido a que el aluminio, aunque a simple vista no lo parezca, se oxida inmediatamente al contacto con el oxígeno del aire, siendo esta capa de óxido precisamente la que funde a temperaturas extremadamente altas. Otro punto en contra es la dificultad para soldar dicho material, porque una vez que el arco eléctrico alcanza la temperatura suficiente para fundir el óxido del aluminio, suele fundir también el resto del material, por lo que, si se sobrepasa el tiempo de exposición, la pieza se fundirá e inservible.

3.11.2. Titanio

Primeramente este material ha sido descartado debido a su prohibición de uso en el reglamento técnico de Motostudent 2012.

El titanio tiene un peso muy bajo y una elevada resistencia, por lo que probablemente es el material que puede proporcionar una ventaja mayor en una estructura multitubular como la diseñada.

Sus principales desventajas son que la estructura flexa demasiado, su elevado coste y las sofisticadas técnicas de soldadura que requiere, aunque su resistencia a la corrosión es excelente.

3.11.3. Magnesio

El magnesio, tanto fundido como trabajado por otros métodos, tiene un elevado coste y presenta grandes dificultades a la hora de ser soldado; tiene la dificultad añadida de una vida limitada debida tanto a la fatiga como a la corrosión.

3.11.4. Materiales compuestos

El empleo de materiales compuestos, como la fibra de carbono y los plásticos reforzados con Kevlar, se ha usado de forma intensiva en el mundo de la Formula 1, ya que los coches son mucho más apropiados que las motos para el empleo de chasis de tipo monocasco. Hoy en día los costes de construcción con este tipo de materiales son aun muy elevados.

3.11.5. Cromo-Molibdeno

Comercialmente el cromo – molibdeno se conoce como Reynolds 531. El Modulo de Young, o lo que es lo mismo, su rigidez, no difiere de la de aleaciones de acero, y tampoco varia su densidad. Su ventaja esta en la carga máxima que puede llegar a soportar antes de romperse. Sin embargo, debido a su elevado coste, su uso se restringe fundamentalmente a la competición.

3.11.6. Acero

El acero es el material más común en la fabricación de basculantes y chasis multitubulares de motocicletas ya que su coste es mucho más económico que otros materiales válidos para dicha fabricación; debido a ello también han conseguido desarrollarse muchas más técnicas de manipulación y soldadura del mismo. También cabe destacar la posibilidad de conseguir la rigidez necesaria utilizando tubos de pequeño diámetro gracias a su elevado Módulo de Young.

3.12. Elección del material

El acero utilizado para la fabricación, tanto del basculante como del chasis, ha sido el 631, cedido por la empresa Reynolds, quienes nos cedieron las gráficas de las figuras 45 y 46 para facilitarnos nuestra elección. Llegamos a la conclusión de utilizar dicho modelo mediante el estudio de las necesidades de nuestro basculante; fuimos comparando los valores que nos gustaría obtener, con los de las gráficas cedidas por Reynolds con todas las características de sus modelos.

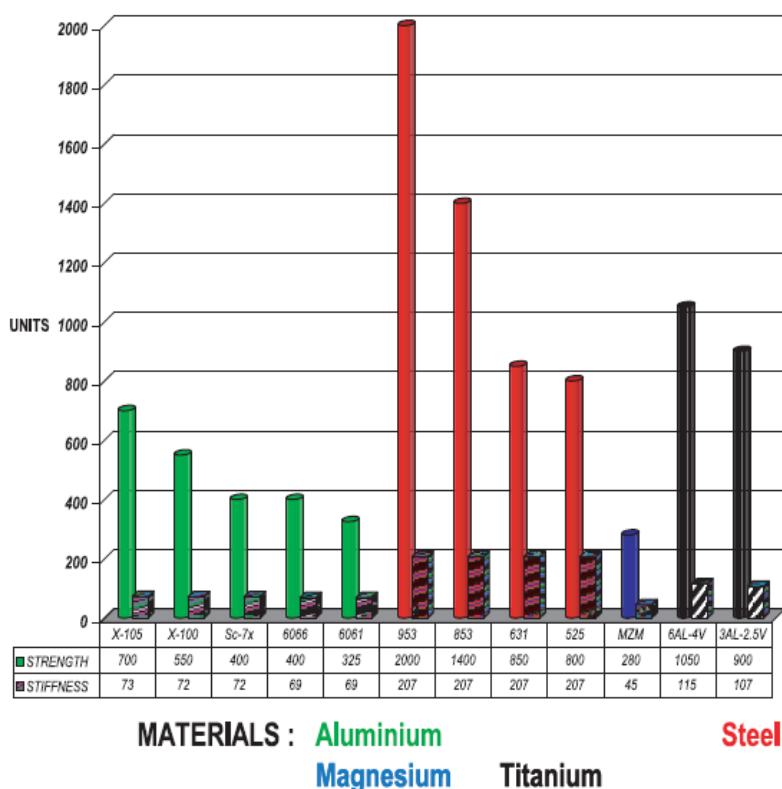


Figura 45. Gráfica de las propiedades de los materiales Reynolds (tensión.VS.rigidez) [28]

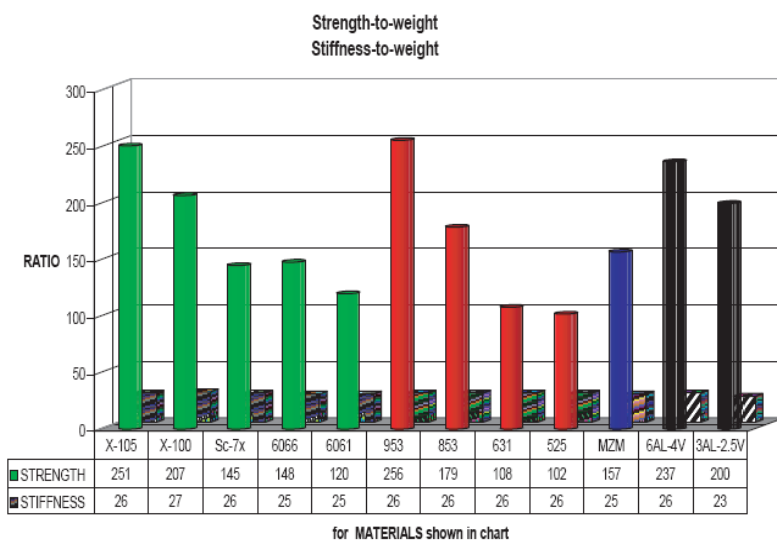


Figura 46. Gráfica de las propiedades de los materiales Reynolds [28]

Finalmente escogimos el 631 ya que, con una tensión admisible de 800-900 MPa, y una densidad de 7.78 gm/cc., era el que más se asemejaba a nuestras necesidades. Dicho material es utilizado en la fabricación de chasis de coches y motocicletas de competición, suspensiones, estructuras multitubulares soldadas, etc. 631 es utilizado también en el ciclismo, por proporcionar gran dureza, durabilidad y comodidad, especialmente a los cuadros de las bicicletas utilizadas para largas distancias. Recientemente ha sido comercializado para el touring y a los revestimientos de horquillas de competición.

Con una composición similar al Reynolds 853, este producto está trabajado en frío y goza de las ventajas de los aceros templados al aire una vez soldados. La aleación es un desarrollo en la familia de los aceros 531 con un 10% más de resistencia.

Se trata de un material que tiene muy buena disposición para ser trabajado en frío especialmente indicado para estructuras soldadas debido a su óptima soldabilidad mediante soldadura T.I.G. Apenas se produce distorsión y las tensiones internas que se dan por la soldadura son bastante escasas. Además la resistencia que se pierde debido al proceso de soldadura es casi insignificante.

Las razones principales por las que nos han llevado a utilizar tubos de este tipo de aleación son básicamente las siguientes:

- Este material puede trabajarse en frío (doblarlo) con facilidad además de que el proceso de soldadura es relativamente sencillo y eficaz.
- La gran variedad de diámetros y espesores ofrecidos por Reynolds nos permitía encontrar las dimensiones exactas para conseguir las características requeridas para nuestro basculante.
- Gracias al patrocinio de Reynolds, tanto el precio como las condiciones de importación desde el Reino Unido eran muy buenas.
- Este tipo de aleación ha sido ampliamente empleada en fabricación de chasis de competición. Un ejemplo actual es la fabricación de la Botttpower para la moto 2 de la temporada 2010-2011.
- Por último, el límite elástico que se consigue con este material hace que la resistencia contra las fuertes acciones que se producen sobre el basculante puedan ser correctamente absorbidas por la estructura sin necesidad de utilizar tubos de gran diámetro y espesor.



Figura 47. Logo acero Reynolds [28]

4. Herramienta de modelado: ProEngineer

La herramienta utilizada en este proyecto es el programa de diseño “ProEngineer”. Procedamos a visualizar su interfaz y explicar las funciones utilizadas para llevar a cabo este proyecto.

4.1. Tipos de archivo

En esta estructura podemos diferenciar principalmente cuatro tipos de archivos:

- Archivos de conjunto (assembly) XXX.asm un archivo de tipo conjunto puede contener uno o más archivos de tipo conjunto o tipo pieza. En el ejemplo del esquema superior, vemos como el modelo “conjunto total.asm” está formado por dos conjuntos (“conjunto1.asm” y “conjunto2.asm”) y una pieza (“pieza4.prt”). Asimismo, el modelo “conjunto1.asm” está compuesto por tres piezas (“pieza1.prt”, “pieza2.prt” y pieza3.prt”)
- Archivo de pieza o componente (part) XXX.prt un archivo de pieza está formado por un conjunto de funciones (extrusiones, cortes, agujeros, etc) en el ejemplo anterior, el modelo “pieza1.prt” está creado haciendo uso de dos funciones (función extrude y función cut)
- Archivo de dibujo (drawing) XXX.drw un archivo de dibujo es un plano en 2D formado por vistas provenientes de los modelos 3D citados previamente (conjuntos o piezas) en el ejemplo, el modelo “pieza3.drw” es un plano con las vistas principales del modelo “pieza3.prt”
- Archivo de esbozo (sketch) XXX.sec los archivos de esbozo nos permiten definir en 2D la forma del esbozo para ser usada posteriormente en una función de construcción. En la figura siguiente vemos como el esbozo de la viga se usará como base para la generación del sólido mediante la función extrude.

En la parte derecha del cuadro de diálogo podemos escoger el subtipo de elemento que queremos crear sólidos, compuestos, chapas o accesorios.

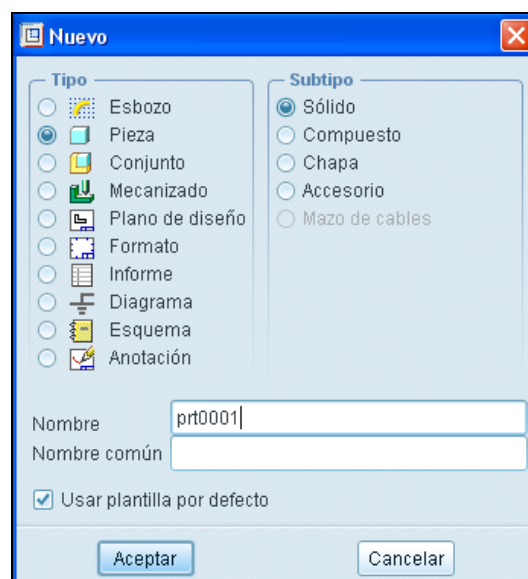


Figura 48. Elección del tipo de archivo en ProEngineer [18]

4.2. Directorio de trabajo

Es importante seleccionar la carpeta de trabajo adecuada antes de comenzar a trabajar con ProEngineer. Las modificaciones realizadas sobre el modelo de trabajo durante la sesión se guardarán en esta carpeta al guardar dicho modelo.

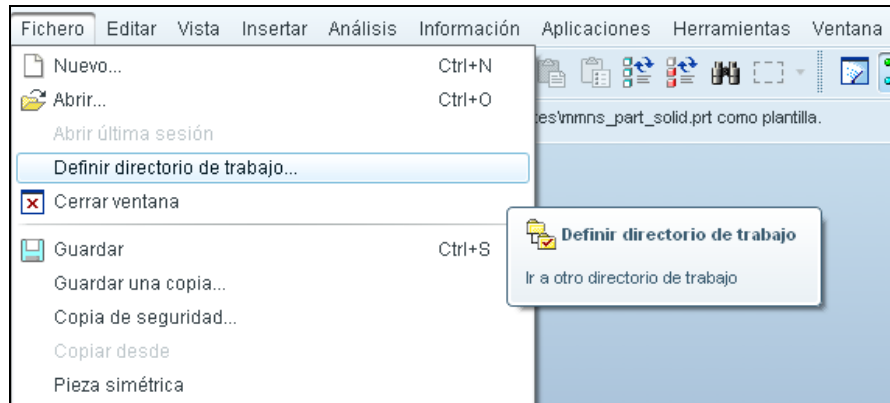


Figura 49. Definir directorio de trabajo en ProEngineer [18]

ProEngineer guarda una versión del modelo activo cada vez que lo guardamos. Es decir, crea un nuevo fichero con el mismo nombre pero con distinta extensión, esta es una diferencia fundamental con otros programas a los que estamos más habituados en los que existe un único fichero que se va sobrescribiendo cada vez que se guarda. Esta funcionalidad que nos ofrece ProEngineer nos permite recuperar las versiones anteriores del modelo sobre el que estamos trabajando. Para recuperar estas versiones previas del modelo, basta con activar la opción todas las versiones en el cuadro de diálogo archivo, abrir.

4.3. Borrado de memoria

Una vez que hemos trabajado sobre el modelo el procedimiento habitual es guardar dicho modelo y cerrar la ventana de trabajo. Al guardar el modelo, este se almacena en el disco, y al cerrar la ventana de trabajo, el modelo sigue aún cargado en sesión aunque no se pueda visualizar a través de una ventana.

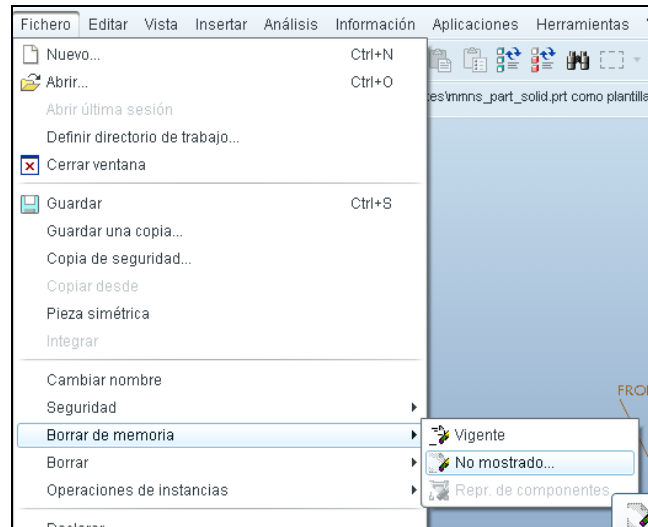


Figura 50. Borrado de memoria en ProEngineer [18]

En caso de intentar abrir un modelo desde el disco que esté cargado previamente en sesión el sistema visualizará el modelo que tenemos cargado en sesión en vez de abrir de nuevo el modelo del disco.

Por ello y para evitar posteriores problemas y bloqueos, hemos de eliminar la memoria no mostrada que se encuentra en el programa.

Si existe más de una ventana abierta es posible cambiar la ventana activa pulsando en “ventana” y posteriormente “activar”. La ventana activa es aquella sobre la que estamos trabajando.

4.4. Modelado de piezas sólidas

El primer paso será crear un esbozo pantalla y así poder crear el perfil a extruir posteriormente; haremos click en botón “esbozo” en el panel de herramientas el cual será igual al mostrado en la fig. 51. Para llevar a cabo dicho esbozo, hemos de elegir un plano en el que realizarlo.

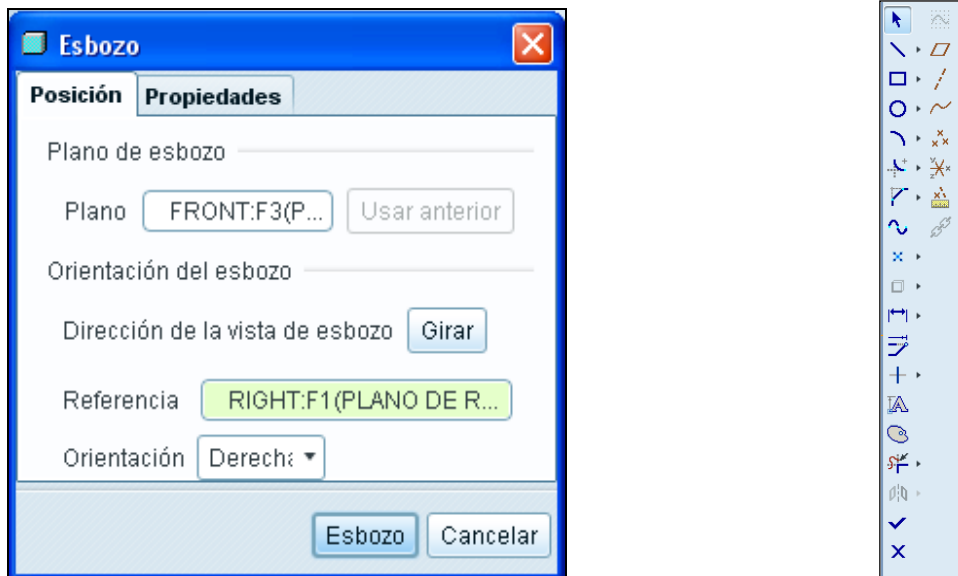


Figura 51. Programa esbozo y herramientas de modelado [18]

Una vez escogido el plano los esbozos se dibujarán con las herramientas de la barra de herramientas. Las cotas podrán modificarse después de realizar el dibujo, pulsando dos veces sobre ellas y modificando su valor.

Finalmente aceptaremos el esbozo para seleccionar posteriormente la función de extrusión, en la cual tendremos que introducir el ancho deseado de nuestra pieza; si el esbozo realizado está enfocado a hacer un vaciado, pincharemos en el botón “quitar material”.

A continuación explicaremos cómo llevar a cabo los diferentes tipos de protrusiones que pueden llevarse a cabo con ProEngineer.

Protrusión por revolución: dentro del menú insertar seleccionamos barrido y protrusión. Llevamos a cabo el mismo proceso que con una extrusión normal. Al finalizar el perfil deseado, sólo tenemos que seleccionar dentro de la opción de línea de la barra de herramientas la opción línea central de geometría y dibujarla sobre el eje de revolución de la misma.

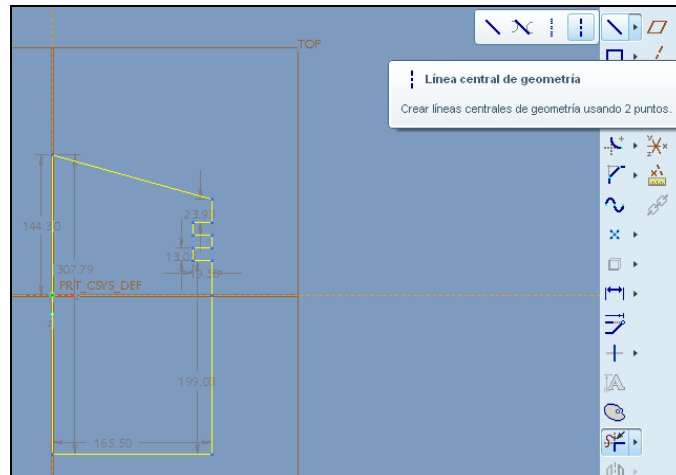


Figura 52. Programa esbozo

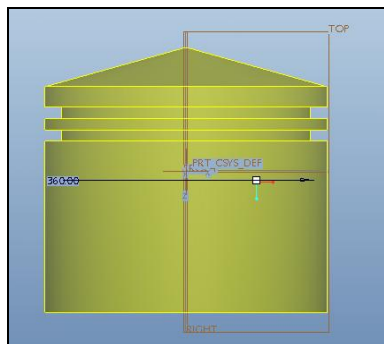


Figura 53. Protrusión por revolución

Protrusión helicoidal: dentro del menú insertar seleccionamos barrido helicoidal y protrusión. En el cuadro de diálogo elegimos los parámetros necesarios. En el modo esbozo definimos con una línea de construcción el eje de la protrusión y con otra línea el perfil de su geometría. Después debemos hacer otro esbozo de la sección.

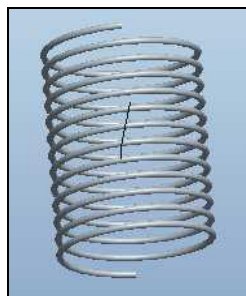


Figura 54. Protrusión helicoidal [18]

Protrusión por secciones: En el menú insertar seleccionamos mezcla y protrusión. Seleccionaremos las opciones deseadas en los cuadros de diálogo. Ahora entramos en el modo esbozo para dibujar la sección. Después de esbozar una de las secciones seleccionaremos en el menú esbozo (en la barra de herramientas superior) herramientas de función y alternar función para dibujar la sección siguiente, repetiremos este paso las veces que sea necesario y posteriormente aceptamos el esbozo. Finalmente, un cuadro de diálogo nos irá pidiendo el espaciado entre las secciones.

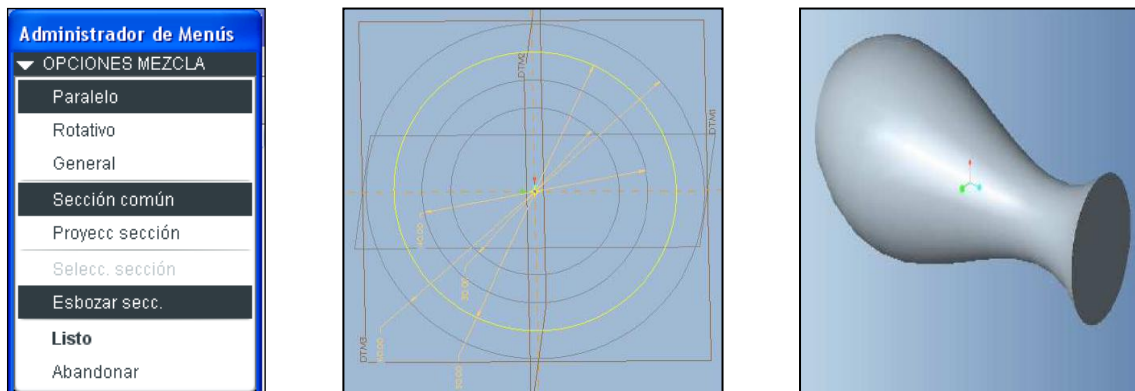


Figura 55. Protrusión por secciones [18]

Protrusión por barrido: seleccionamos en el menú insertar barrido y protrusión. Posteriormente, definiremos la trayectoria y aceptaremos su esbozo.

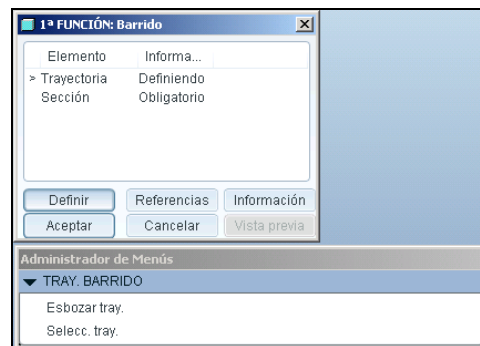


Figura 56. Elección protrusión por barrido [18]

Sin salir del modo esbozo (simplemente girando los planos a la posición adecuada) dibujaremos la sección que recorrerá la trayectoria y aceptaremos la función.

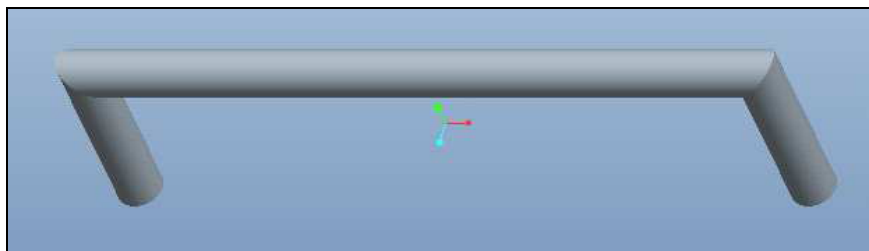


Figura 57. Protrusión por barrido [18]

Patrones: Pulsamos con el botón derecho sobre la operación a la que aplicaremos el patrón en el árbol de modelo o directamente pinchando sobre la pieza sólida y seleccionamos Patrón. Elegimos el tipo de patrón (cota, axial, dirección, relleno). Completamos las opciones deseadas de número de repeticiones y ángulo o distancia entre ellas. Aceptamos la función y el patrón será generado automáticamente.

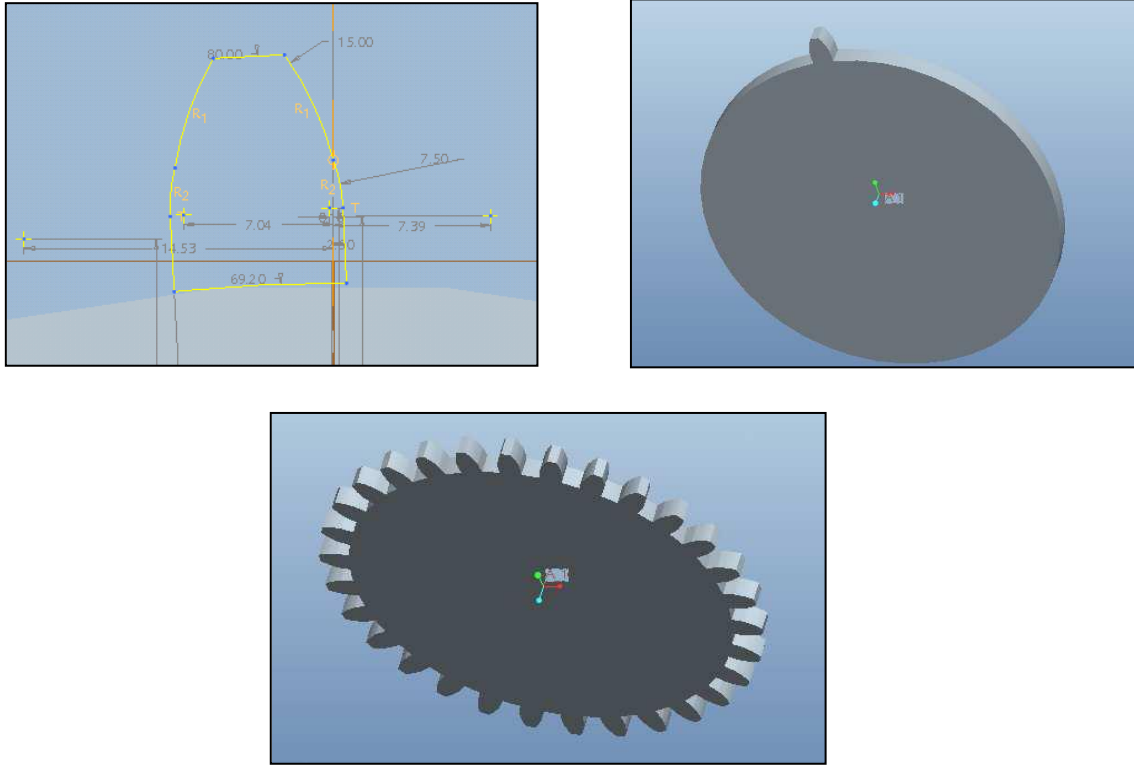


Figura 58. Pasos para llevar a cabo un patrón [18]

Otras operaciones: Podemos realizar otras operaciones como chaflanes, redondeos, cáscaras, agujeros o simetrías seleccionando su icono correspondiente, la parte de la pieza a la que le queremos realizar la operación y completando las opciones necesarias para cada operación. Después pulsaremos en aceptar para completar la función.

4.5. Modelado de chapa

Dibujamos un esbozo (no debe ser cerrado necesariamente). Seleccionamos protrusión y elegimos la profundidad y el espesor de la chapa. Agregamos más superficies pulsando sobre la opción deseada y la arista donde la colocaremos. Acotamos las superficies agregadas y aceptamos. Podemos realizar más operaciones, como taladros o simetrías desde el menú insertar.

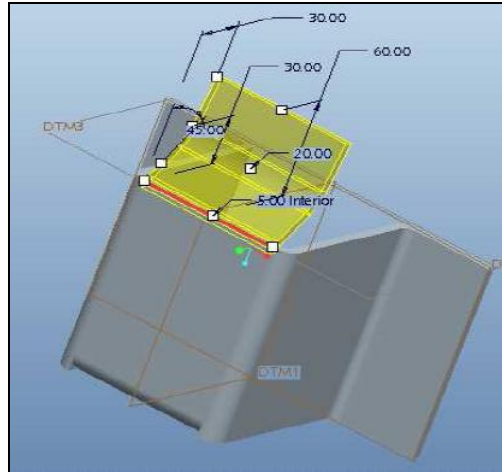


Figura 59. Modelados de chapa en ProEngineer [18]

4.6. Conjuntos

Para comenzar debemos introducir los componentes; seleccionamos el icono montar componente situado en la barra de herramientas de la derecha, y en el cuadro de diálogo seleccionamos la pieza deseada; este componente aparecerá resaltado de color amarillo en la pantalla. Pulsaremos dicho icono cada vez que deseemos introducir un nuevo elemento al conjunto. A partir del segundo componente, deberemos introducir las restricciones deseadas para acoplarlo al conjunto y pulsaremos aceptar. Podremos realizar un explosionado del conjunto desde el menú vista y mover las piezas pulsando sobre ellas.

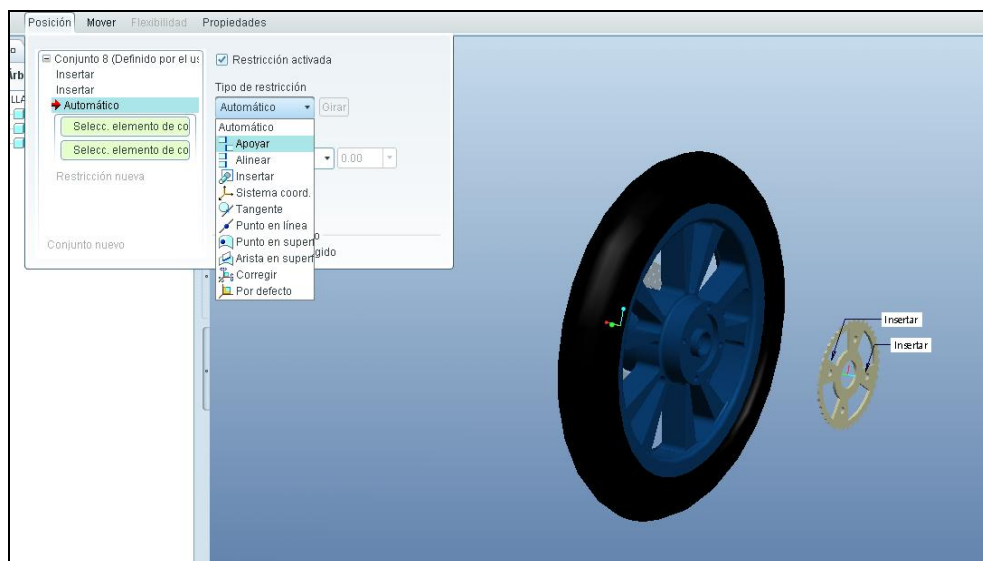


Figura 60. Conjunto

4.7. Planos

En el cuadro de diálogo nuevo seleccionamos plano. Posteriormente, elegimos la plantilla de plano y la pieza. Se creará el plano en el cual automáticamente podemos realizar modificaciones pinchando sobre las piezas o cotas. Dichas modificaciones quedarán archivadas automáticamente en la pieza.

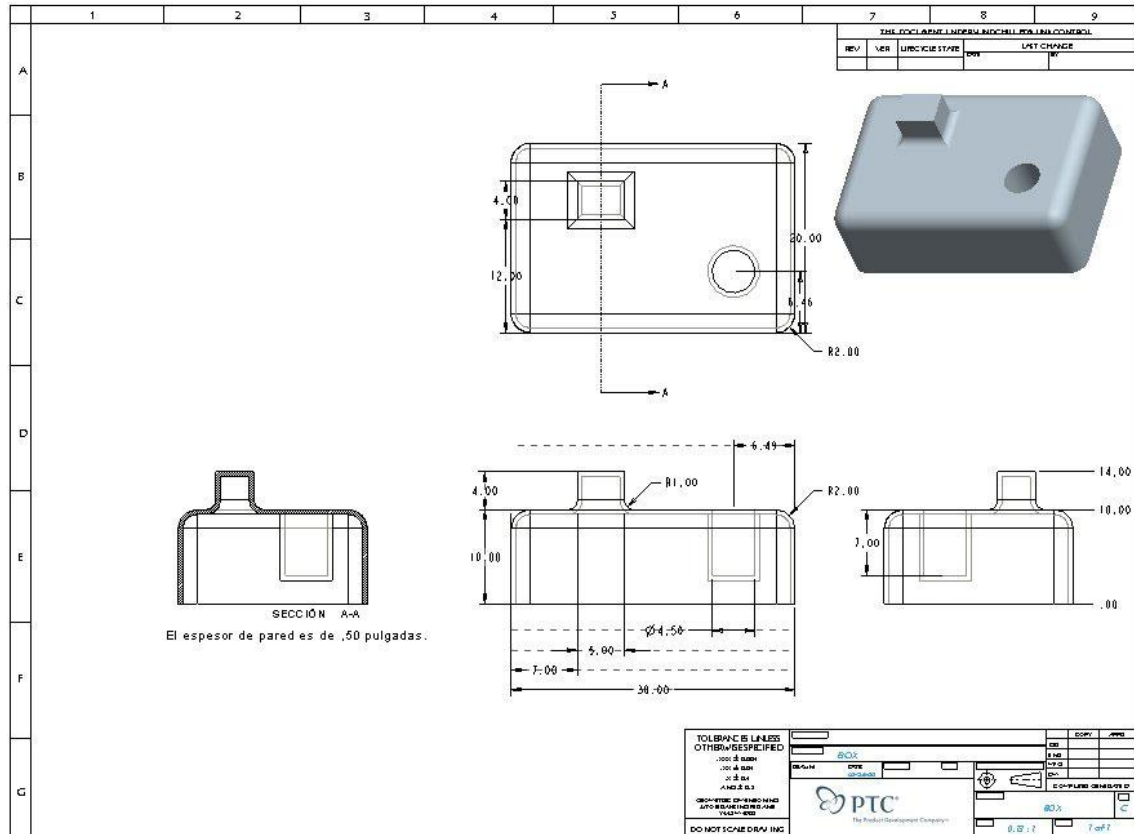


Figura 61. Plano en ProEngineer con cuatro vistas [18]

4.8. Módulo Mechanical


Mechanica es la parte de ProEngineer que nos permite realizar simulaciones estructurales y térmicas avanzadas a todo tipo de geometría incluyendo sólidos, corazas, vigas, o modelos mixtos. La simulación estructural y térmica avanzada de ProEngineer contiene una librería robusta de herramientas que permiten construir modelos de simulación rápidos, los cuales incluyen: análisis de deformación no lineal grande, análisis estático de tensión previa, incluido los efectos de rigidización de tensión, análisis modal de tensión previa, incluido los efectos de flexión a la rotación, análisis térmico transitorio, análisis dinámicos de respuesta: temporal, frecuencial y aleatoria o choque.


El utilizado en este proyecto es la herramienta de análisis estructural, la cual permite realizar análisis estructurales a una pieza o conjunto, ya sean estáticos, modales, dinámicos, de fatiga. Para realizar los análisis, se deben tener los datos de cargas, materiales y restricciones de movimiento.



	Carga de Fuerza - Momento		Estructura		Control
	Carga de Presión		Resorte		Región de Superficie
	Carga por gravedad		Masa		Región de Volumen
	Carga por gravedad		Interface		Esbozo
	Carga Centrifuga		Soldadura		Plano
	Carga Global de Temperatura		Conexión Rígida		Eje
	Restricción de Desplazamiento		Conexión con Peso		Curva
	Restricción de Simetría		Material		Esbozo
	Carcasa		Asignación del Material		Sistema de Coordenadas
	Par de Carcasa		Simulación de Medida		Carga de Calor
	Temperatura Prescrita		Condición de Convección		Simetría Térmica
	Visualización de Simulación		Resultados		Análisis y Estudios de Mecánica
	Crear Mallado				

Figura 62. Comandos en Mechanical

A continuación se enumerarán los pasos para realizar un análisis simple en Mecánica:

1. Abrir la pieza que se va a analizar.
2. Iniciar el módulo Mecánica en Pro-E: Aplicaciones > MECHANICA. Dejar las unidades por defecto. Luego aparece la ventana de Mecánica, en la cual se elige el tipo de análisis que se desea (Estructural o térmico).
3. Se le asigna el material adecuado. Para ello haremos click en el icono Materiales  y aparecerá la librería de materiales del programa.

Se elige el material que se desee y se agrega en la siguiente columna haciendo click en . Se pueden seleccionar varios materiales ya que esta ventana es para preseleccionar dichos materiales y ver sus propiedades. Cabe destacar que Mecánica ofrece la oportunidad de crear nuevos materiales.

Haciendo click en el icono  se definen las propiedades estructurales y térmicas del material, en esta ventana se encontraran datos de la densidad, conductividad térmica, se selecciona el criterio de falla, coeficiente de expansión térmica. Luego se hace click en 'Asignación de Materiales'  para asignar el material final de la pieza.

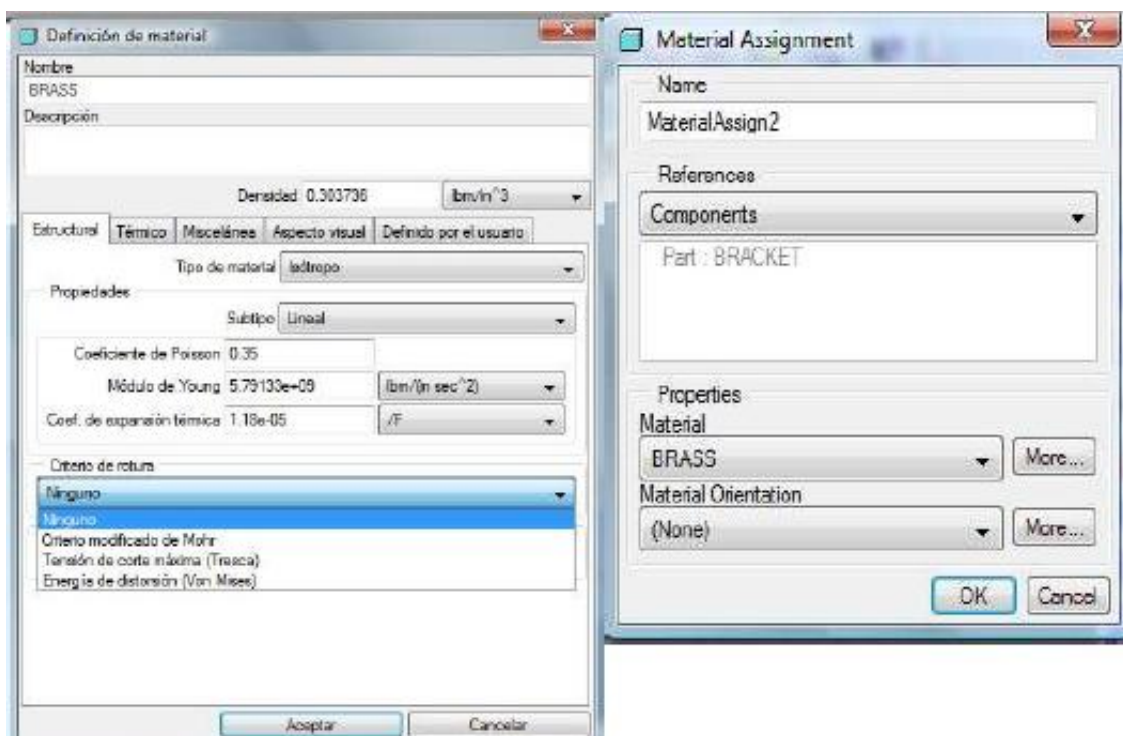




Figura 63. Definición del material [18]

4. Posteriormente, agregaremos las restricciones a la pieza (solo para estructural). Las restricciones se definen para que la pieza no se mueva, o solo se pueda mover en una dirección determinada, al aplicársele la carga. Solo al definir las restricciones del modelo, se puede observar el efecto de las fuerzas. Las restricciones pueden ser para evitar movimiento de traslación y de rotación, cada una con sus tres componentes correspondientes a los ejes X, Y y Z.

Para activar la caja de diálogos de las restricciones, se hace click en 'Restricciones' .

5. Para especificar la carga aplicada, se hace click en Carga de Fuerza –Momento . En la caja de dialogo se presenta la opción de colocar la fuerza en cualquiera de los ejes (X, Y y Z) y también como se observa en la figura que se pueden definir cargas de momento.

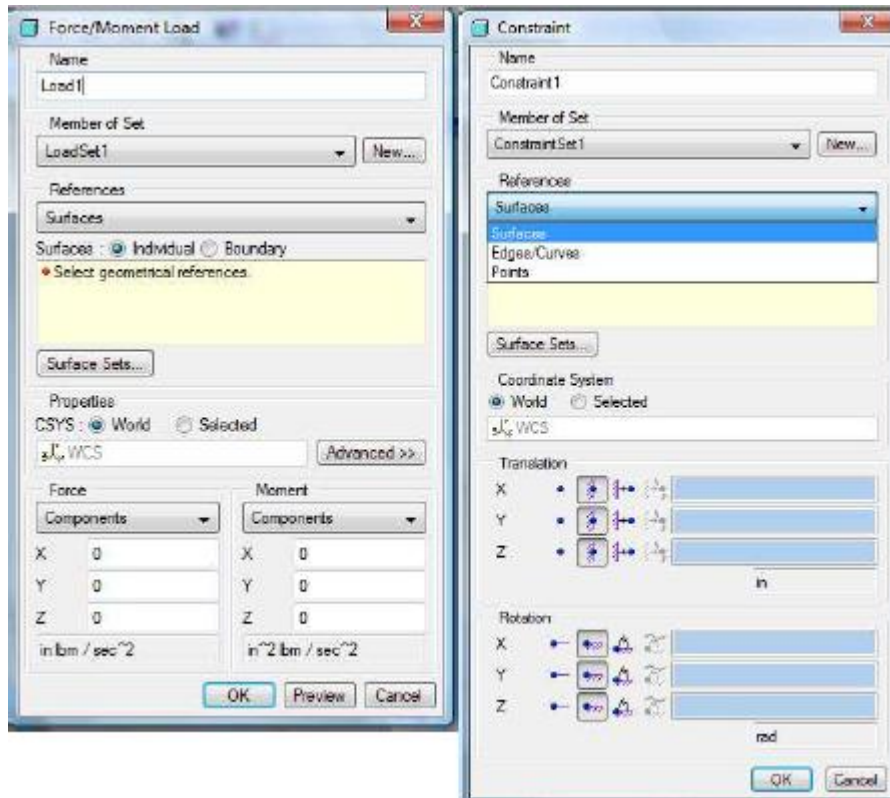


Figura 64. Restricciones y cargas [18]

6. El penúltimo paso será crear el mallado de la pieza. En general, la malla requerida para en análisis es generada automáticamente por el programa, pero esta puede ser modificada por el usuario. Esto se puede realizar de dos formas: especificando el tamaño del mallado o especificando el ángulo del mallado.

- Especificando el tamaño del mallado



Haciendo click en  para desplegar el menú de AutoGEMControl, en esta se especifican las dimensiones del elemento. Luego se hace click en 'Crear Mallado'  y obtendremos la pieza mallada.



Figura 65. Ajustes para crear el mallado [18]

- Especificando el ángulo del mallado desplegando el menú: AutoGEM>Configuraciones>Limits

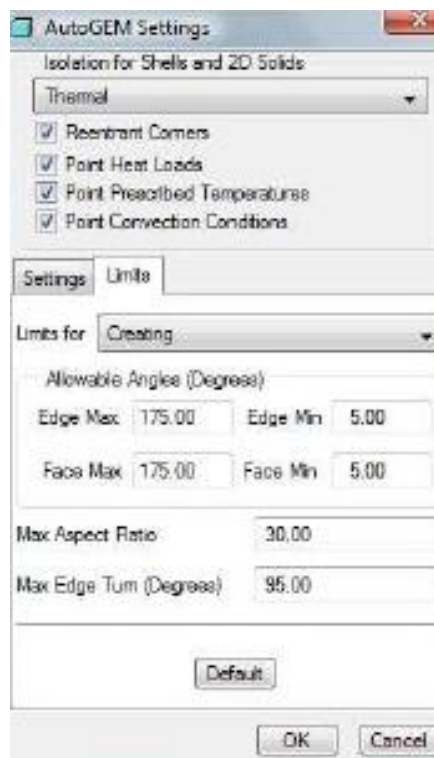



Figura 66. Dimensiones de la malla [18]

7. Por último, definiremos el análisis. Primero se especifica el tipo de análisis, estructural (estáticos, modales, dinámicos, de fatiga) o térmico (transitorio o Estacionario). Luego se ordena al programa el comienzo del análisis presionando el botón .

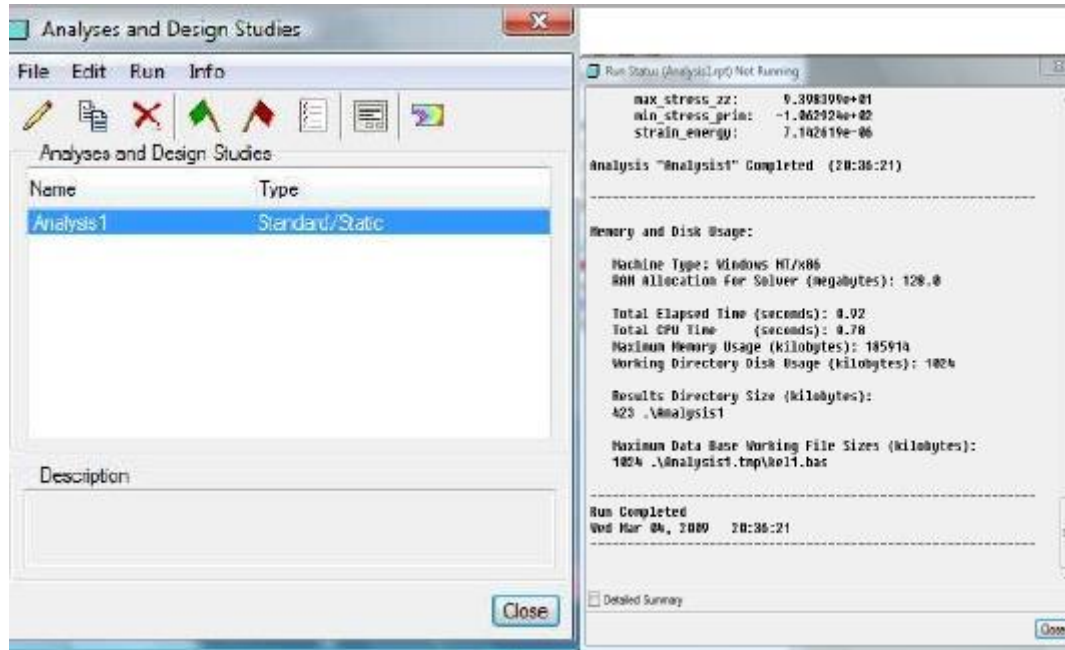


Figura 67. Análisis de la pieza [18]

Cuando el sistema finalice, aparecerá la ventana para seleccionar los resultados que se desean observar.

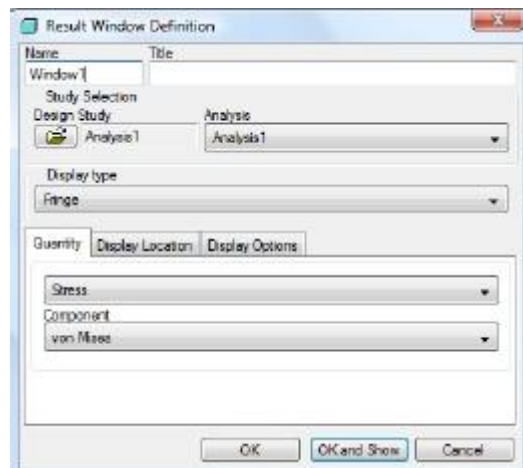


Figura 68. Pantalla de elección de resultados [18]

5. Metodología

5.1. Pautas

En el proceso de diseño de un basculante para la participación en la competición Motostudent II se han seguido el organigrama adjuntado más tarde. Primeramente, se enumeraron los campos más importantes de nuestro proyecto, como por ejemplo son el diseño, el análisis o el criterio de selección, y dentro de cada uno se delineó un modo de actuación para desarrollarlos de una manera apropiada.



Esquema 1. Flujo de trabajo

- Lo primero que se llevó a cabo fue una lista de requerimientos que la propia institución de Motostudent nos impuso. En el punto 5.2 se adjunta la información enviada por la organización al respecto.
- Posteriormente se recopiló información de motos de competición similares a la que nosotros vamos a desarrollar para tener una idea general de partida.
- Una vez obtenidos los primeros modelos, nos cercioramos de que todos los elementos funcionaran de una forma eficiente dentro del conjunto.
- El siguiente paso a dar fue la mejora del mismo, modificando las diferentes características de nuestra pieza.
- Para llevar a cabo la elección del modelo óptimo para el empleo del mismo en la motocicleta de competición, se utilizaron como criterios de selección los valores de tensión, desplazamientos, peso, costo de materia prima y dificultad de fabricación, dándole importancia en ese orden.

5.2. Bases técnicas de la competición

En concreto para la competición Motostudent 2012 han de cumplirse ciertos requisitos de diseño que veremos a continuación; nos centraremos en explicar los concernientes a la parte del basculante y los elementos que lo infieren.

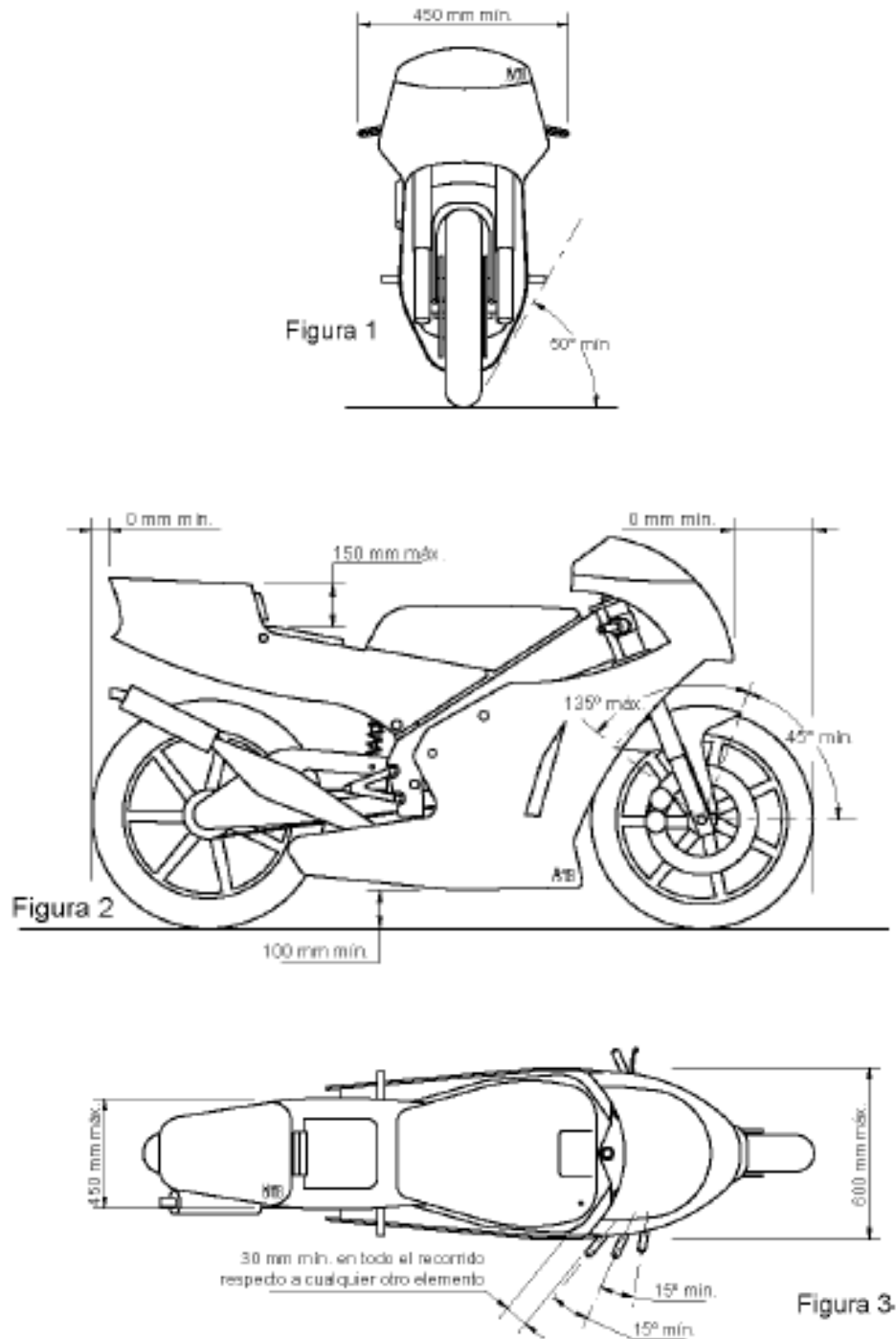


Figura 69. Cotas límite de la motocicleta [16]

5.2.1. Cotas generales

Las dimensiones de la motocicleta son libres exceptuando algunos requisitos básicos:

- La anchura mínima entre los extremos de los semimanillares (o manillar en su caso) ha de ser de 450 mm. (Figura 1 dentro de la fig. 69)
- El ángulo mínimo de inclinación lateral de la motocicleta sin que ningún elemento de la misma (exceptuando los neumáticos) toque el pavimento debe ser 50°. Dicha medición se realiza con la motocicleta descargada (sin piloto) pero con todo el equipamiento y líquidos para su funcionamiento. (Figura 1 dentro de la fig. 69)
- La distancia libre al pavimento con la motocicleta en posición vertical ha de ser de un mínimo de 100 mm en cualquier situación de compresión de suspensiones y reglajes de geometrías. (Figura 2 dentro de la fig. 69)
- Límite posterior: Ningún elemento de la motocicleta podrá rebasar la línea tangente vertical trazada a la circunferencia exterior del neumático trasero. (Figura 2 dentro de la fig. 69)
- Los neumáticos deberán tener una tolerancia mínima de 15 mm con cualquier elemento de la motocicleta en toda posición de la misma y reglaje de geometría.
- La anchura máxima del asiento debe ser de 450 mm. No podrá sobresalir de esa anchura ningún otro elemento de la motocicleta del asiento hacia detrás excepto el sistema de escape. (Figura 3 dentro de la fig. 69)

5.2.2. Pesos

El peso mínimo del conjunto de la motocicleta en orden de marcha incluido depósito, gasolina y líquidos no deberá ser inferior a 95 kg en cualquier momento de las pruebas. El peso se podrá verificar tanto al inicio, durante y final de la competición.

Está permitido lastrar el vehículo para alcanzar el peso mínimo.

5.2.3. Bastidor

El diseño, el proceso y el material utilizado para la fabricación del bastidor es libre excepto en las siguientes consideraciones:

- No está permitido fabricar el chasis en titanio ni aleaciones de titanio.
- El bastidor definitivo a presentar en la competición deberá haber superado el proceso de homologación por parte de la organización. (Ver criterios de verificación)
- No se permite el uso de un chasis comercial ni tan siquiera una unidad modificada. Deberá tratarse de un chasis prototipo de fabricación propia.

5.2.4. Suspensión trasera

En el caso de uso de amortiguador en la composición de la suspensión trasera se deberá utilizar el proporcionado por la organización.

El amortiguador proporcionado por la organización no puede ser modificado estructuralmente. Se permite el reglaje del amortiguador solo en base a cambio de muelles y fluidos hidráulicos.

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en los ejes de rotación de los componentes del sistema de suspensión trasera. No podrán utilizarse sistemas activos o semiactivos y/o controles electrónicos de cualquier parámetro de la suspensión.

5.2.5. Freno trasero

Deberá utilizarse el conjunto de freno delantero (bomba, latiguillos y pinza) proporcionado por la organización.

Se permite la elección del tipo de pastillas y disco de freno. Se permite la sustitución de los latiguillos de freno por otros de diferente longitud.

La situación del accionamiento de la bomba de freno y la modificación de la leva de accionamiento es libre con la restricción de que, si su ubicación fuese el manillar, su longitud no podrá ser superior a 200 mm y su extremo deberá ser una esfera de un diámetro mínimo de 18 mm. La esfera podría estar rectificada con un plano de una anchura mínima de 14 mm, los bordes del plano han de ser redondeados.

5.2.6. Estriberas

Como requisito deberán tener protegidos los extremos con un tope de nilón de un radio mínimo de 8 mm.

Deberán disponer de protectores laterales para evitar que la bota del piloto pueda interferir con elementos móviles como cadena o neumático trasero.

5.2.7. Basculante

El basculante deberá ser de fabricación propia. Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en la fabricación de los ejes de rotación del basculante.

Es obligatorio el uso de un protector de cadena que impida la interferencia entre el cuerpo del piloto y el punto de engrane cadena-corona en la rueda trasera.

5.2.8. Llantas y neumáticos

La organización suministrará las llantas y neumáticos y se prohíbe su modificación. Sus dimensiones serán:

Delanteras 2.50"x17" Traseras, 3.50" x 17

Está prohibido el uso de titanio, aleaciones ligeras y compuestos de fibra en la fabricación de los ejes de ruedas.

Está permitido el uso de protectores de nilón en los extremos del eje para posibles caídas. Estos protectores deberán ser redondeados con un diámetro igual o superior al del eje utilizado.

Los ejes de rueda no podrán sobresalir de su alojamiento en sus extremos más de 30 mm. No se consideran en esta medida posibles protectores de nilón.

5.3. Diseño principal

Para el primer boceto del basculante se tuvieron en cuenta las cotas que lo limitarían, así como las restricciones marcadas por la organización descritas en el punto anterior, la cual obliga a utilizar el software ProEngineer tanto para modelar como para analizar el modelo.

En cuanto a las cotas restrictivas, unas de las más importantes son los puntos de anclaje al motor. El motor utilizado es el aportado por la organización, un Yamaha WRF 250 del año 2011. Este fue modelado a partir del original, cuando fue recibido, se tomaron medidas directamente del mismo. Inicialmente se triangularon los taladros para obtener su posición exacta.

Posteriormente se creó un bloque y se fueron esculpiendo los salientes del mismo, poniendo especial cuidado en las partes que podrían rozar tanto con la trayectoria del chasis como del basculante.

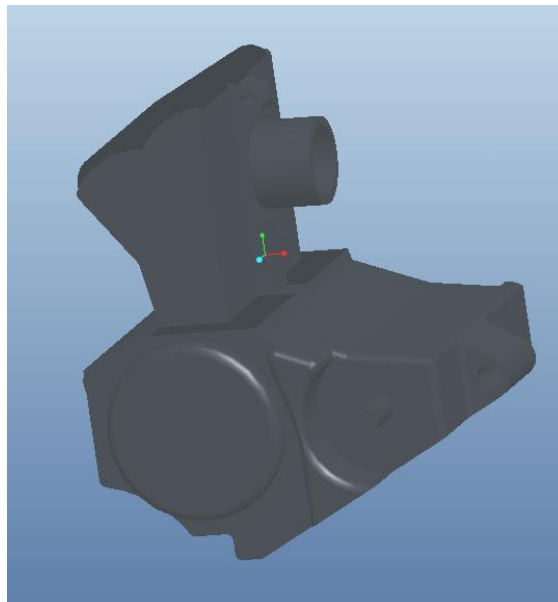


Figura 70. Motor modelado



Página 76

El último elemento predefinido que condicionará nuestro diseño será el amortiguador, del cual también nos fueron enviados planos para proceder a su modelado.

Amortiguador trasero

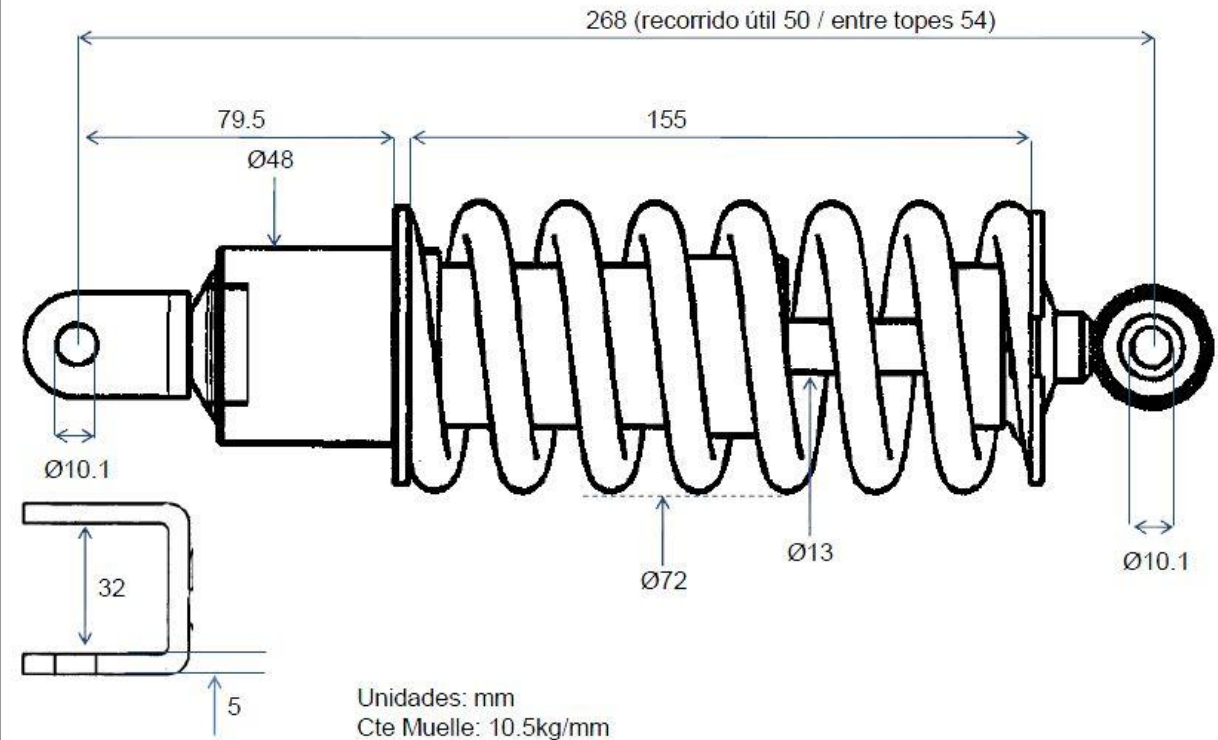


Figura 72. Plano del amortiguador [16]

Sabiendo que el amortiguador era el utilizado en la Yamaha YZF-R125, pudimos buscar los datos concernientes al recorrido del mismo para delimitar su trayectoria y cerciorarnos de que no chocará con otras piezas contiguas.

En cuanto a las restricciones de Motostudent, únicamente es en base al material utilizado, el cual no podrá ser titanio, aleaciones ligeras o compuestos de fibra. También hemos de tener en cuenta que al ensamblar la motocicleta, no puede superar las medidas máximas acotadas por la organización.

5.4. Parámetros en el análisis de la pieza

Cada uno de los modelos será analizado en una situación crítica como es la salida de una curva, en la cual, la aceleración hace que el eje trasero soporte la máxima carga debido a la transmisión de pesos desfavorable sufrida y a la inclinación que corresponde al paso por curva; como podemos ver en el esquema de la figura 73, la componente tangencial de la fuerza a la que está sometida la rueda, crece de una forma directamente proporcional al ángulo de inclinación de la motocicleta. La velocidad estimada para esta situación ha sido de unos 70 km/h. En este caso, hemos utilizado un factor de seguridad muy alto para asegurarnos de que nuestra pieza resistirá sin problema a los futuros esfuerzos. Dichos análisis se verán en profundidad en el capítulo “Desarrollo del proyecto”.

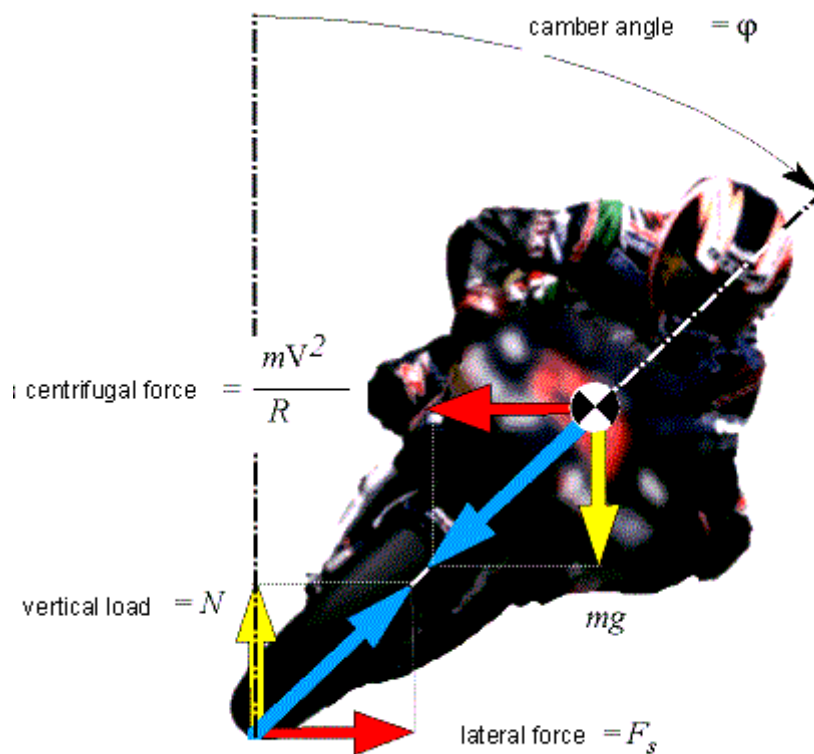


Figura 73. Fuerzas en una motocicleta en movimiento [22]

6. Desarrollo del proyecto

6.1. Diseños preliminares

Para llevar a cabo el diseño del basculante, los miembros del equipo decidimos distribuirnos en grupos de trabajo. Así, cada grupo se dedicaría a diseñar un basculante diferente obteniendo así una lluvia de ideas.

Posteriormente, bajo supervisión del director técnico, se eligieron los modelos que se creían más aptos para la construcción y se analizaron con el programa Pro-e.

En este proyecto se compararán dos diseños, los cuales se han ido evolucionando gradualmente según se iban analizando e íbamos visualizando los fallos que podría tener. Pasemos a citar la evolución de los mismos.

Para hacernos una idea previa de las cotas generales que debería tener nuestro basculante, creamos un diseño en 2D (fig. 74) con la posición que más o menos querríamos que tuvieran motor, horquilla y ruedas.

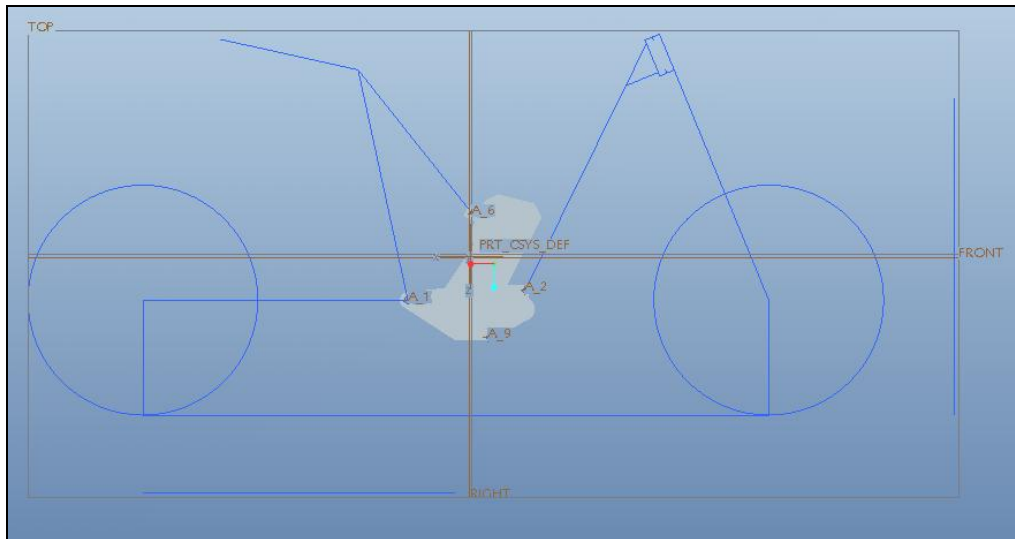


Figura 74. Diseño 2D

Con los datos de las cotas aproximadas ya obtenidos, se decidió crear un basculante como el utilizado en las motos de campo. Un diseño simple (únicamente con una línea de material) y resistente. La idea nos gustó ya que se trataría de un diseño fácil y económico de construir, el cual se encontraba dentro de los límites de deformación y carga requeridos.

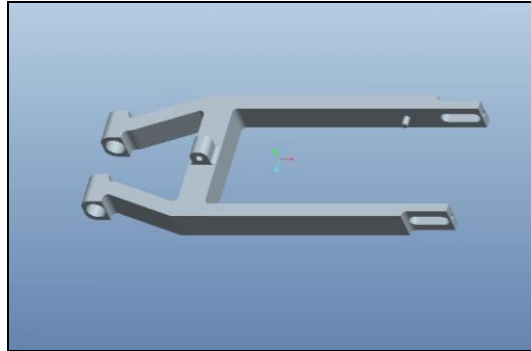


Figura 75. Diseño de basculante mecanizado

Aún con los extraordinarios resultados obtenidos por este diseño, decidimos crear un basculante tubular debido a que, con el patrocinio de Reynolds, era más viable un diseño tubular que uno mecanizado, por muy simple que fuera. Basándonos en la moto 2 creada para la temporada pasada por el equipo australiano MZ se modeló la siguiente estructura:

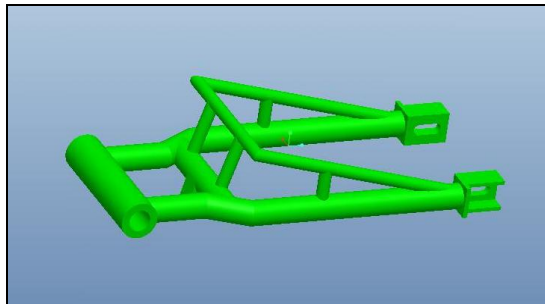


Figura 76. Diseño de basculante multitubular 1

De forma paralela, otro grupo de trabajo creó otro diseño menos anguloso que el anterior, el cual contaba con tirantes que unían la zona cercana al eje donde se uniría con el chasis, con el tubo superior del basculante. Con estos tubos conseguimos darle algo más de rigidez a torsión.

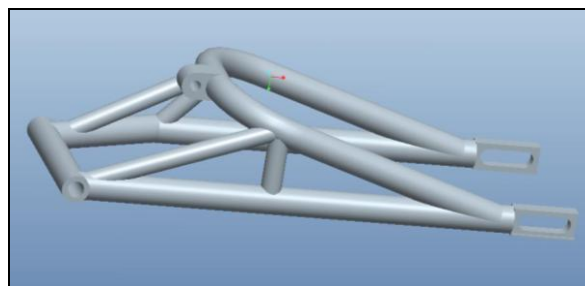


Figura 77. Diseño de basculante multitubular 2

Decidimos montar un conjunto, el cual puede verse en la fig. 78, añadiendo todas las partes que habíamos modelado de la zona trasera sobre todo para ubicar el sistema de amortiguación completo y saber si necesitábamos dejar más espacio en ciertas zonas.

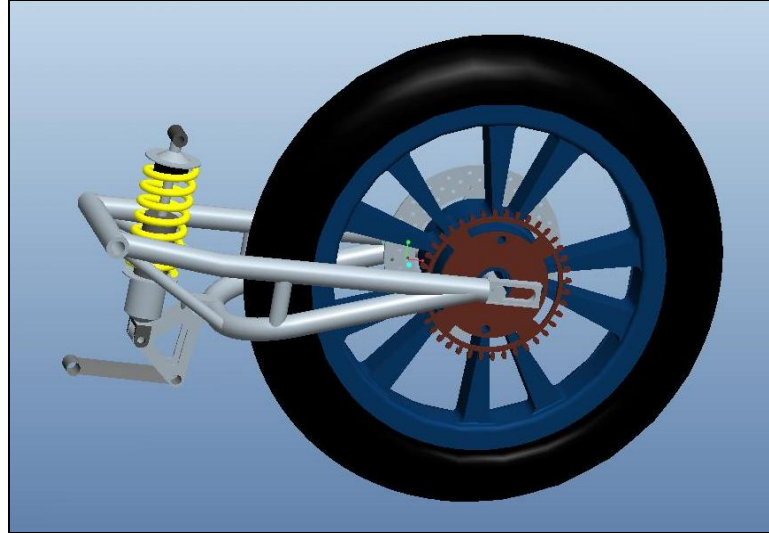


Figura 78. Conjunto trasero

Así nos dimos cuenta de que el movimiento que realizaban las bieletas quedaba bastante acotado debido al encajonamiento del sistema.

Estos dos últimos diseños fueron desechados cuando fue recibido el kit de motostudent, ya que, el anclaje del motor al basculante constaba de un semieje central y nuestros diseños anteriores tenían un eje que lo atravesaban completamente. Bastó con retocar la zona del eje de unión chasis-basculante, creando así dos semi-ejes que quedarían a ambos lados del motor.

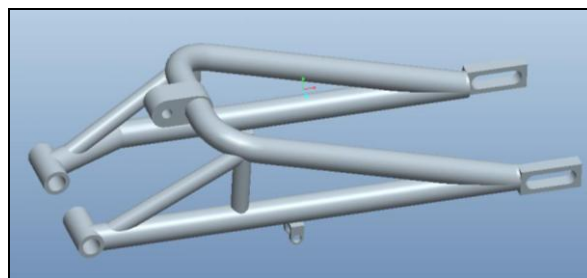


Figura 79. Diseño de basculante multitubular 3

Como último diseño, se modeló el siguiente; mucho más rígido que el anterior.

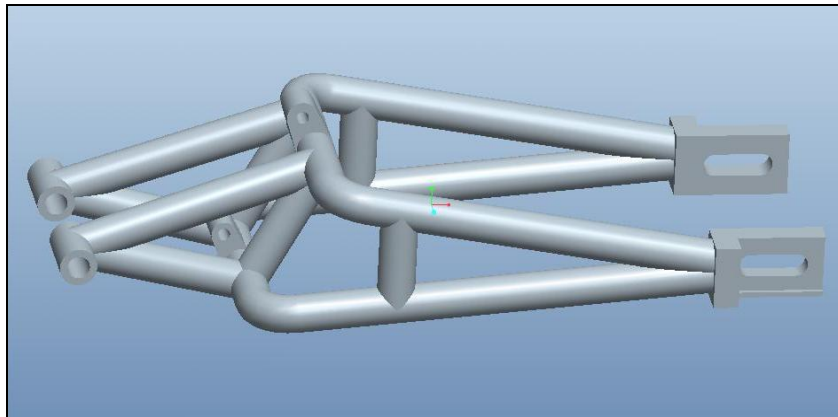


Figura 80. Diseño de basculante multitubular 4

Este último diseño de la fig. 80 fue descartado debido a la complejidad de ubicar el sistema de amortiguación. Se diseñó una pieza basándonos en esta última, pero solucionando el problema de espacio para la suspensión; entonces se consiguió el siguiente diseño, el cual compararemos con los modelos monobrazo implementados en este proyecto:

6.2. Basculante monobrazo

Una de las apuestas realizadas por nuestro grupo de trabajo fue un basculante monobrazo.

Se llevaron a cabo varios diseños, partiendo de la misma base: el basculante utilizado por la Honda VFR 800; dichos diseños, algunos de los cuales pueden observarse en la figura adjunta, han sido creados a base de protrusiones a lo largo de las líneas previamente esbozadas.

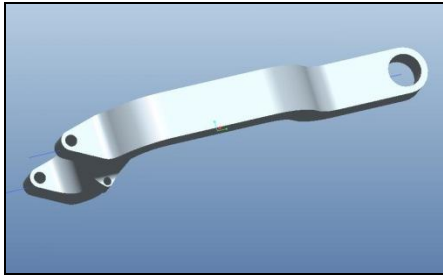


Figura 82. Modelo 1 de basculante monobrazo

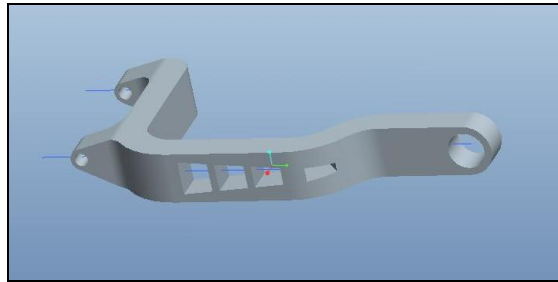


Figura 81. Modelo 2 de basculante monobrazo

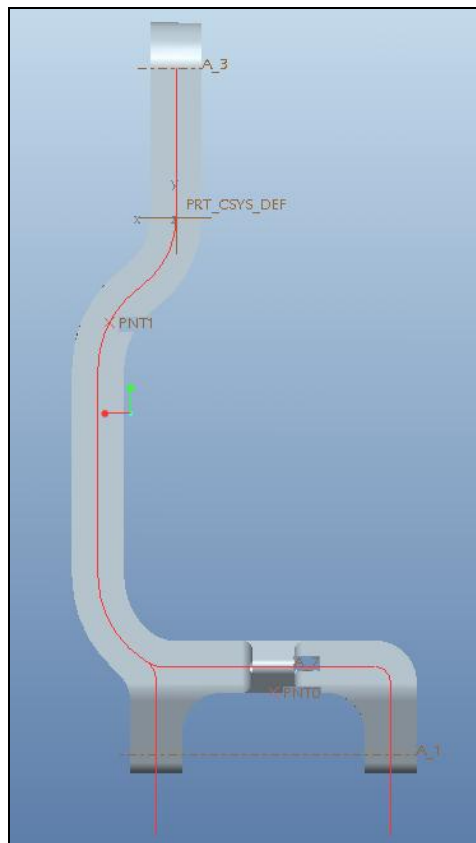


Figura 83. Líneas seguidas para el diseño de basculante monobrazo

Posteriormente se optimizó el diseño creando una cáscara ya que, realizando el estudio de elementos finitos se vio que excedía nuestras necesidades; así conseguiríamos un diseño mucho más ligero e igualmente resistente.

El siguiente paso fue crear las restricciones pertinentes. Abriendo el módulo Mechanical, definiremos el material (Steel), y crearemos, en el taladro donde se alojará el amortiguador, una restricción de pin, bloqueando la rotación y la traslación como se muestra en la figura 85. En los taladros donde se unirá el basculante al chasis restringiremos, también con restricción de pin, solamente la traslación.

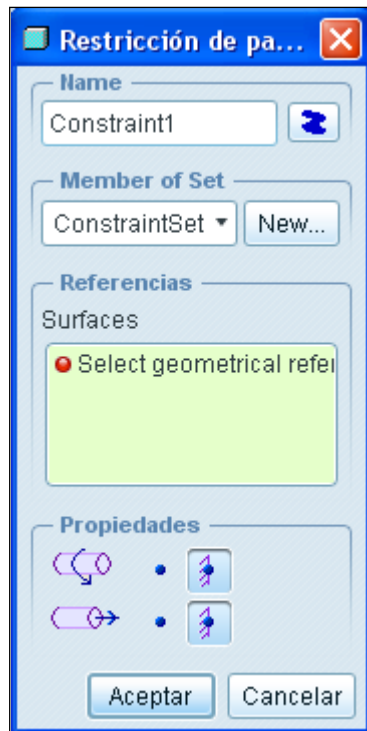


Figura 85. Restricciones unión amortiguador

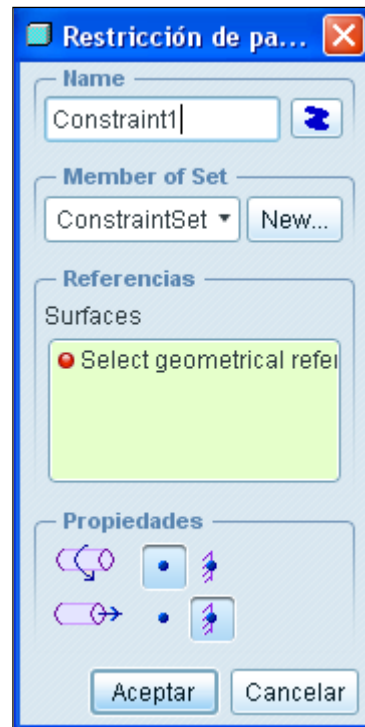


Figura 84. Restricciones unión chasis

Ahora hemos de introducir la carga. Para ello, hemos contado con la masa de la motocicleta, la del piloto, la fuerza g (la cual tomamos en la salida de una curva ya que será la más crítica, poniendo como valor la unidad); el valor obtenido lo multiplicamos por el coeficiente de seguridad, el cual hemos tomado como 1,2. Estos cálculos dan un valor final de 2000 N., el cual pondremos sobre la superficie del soporte del eje trasero del basculante, en sentido -Y. El sentido dependerá de qué plano hayamos escogido para modelar la pieza; así en el modelo 1 habrá que introducir la carga en el eje Y, y en el modelo 2 habrá que hacerlo en el Z.

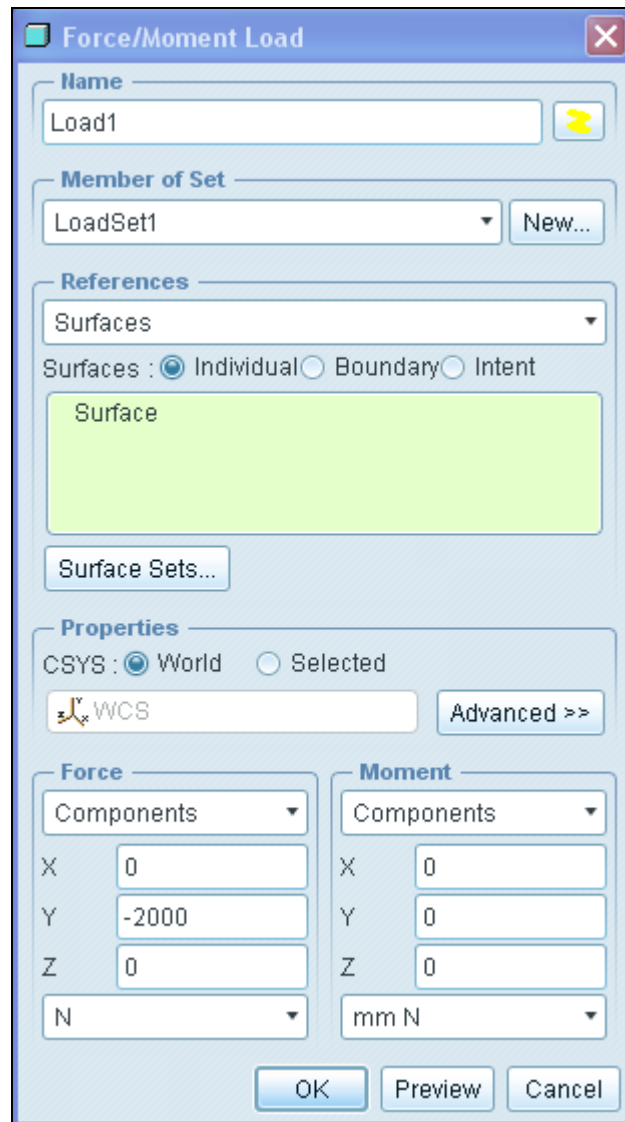


Figura 86. Cargas sobre la estructura

6.3. Evolución de los diseños

En este apartado me dispondré a enumerar las evoluciones sufridas por los diseños y el por qué de cada cambio.

Inicialmente se modeló un diseño bastante simple teniendo como punto de partida las cotas del basculante de la Honda VFR 800. Este primer modelo, el cual podemos ver en la figura 87, se trata de un prototipo de acero macizo y anguloso. Los diámetros tomados de los elementos colindantes, los cuales fueron diseñados a priori y delimitaban así las restricciones de tamaño; por ejemplo, sabíamos que el soporte para la bieleta debería de tener un diámetro interior de 10,1 mm.

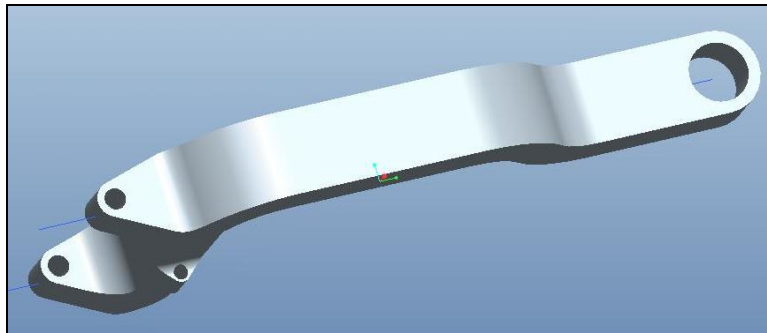


Figura 87. Modelo 1 de basculante monobrazo

Una vez analizado este modelo, se vio que los valores de tensión admisible que podía alcanzar eran demasiado altos para nuestros requerimientos; debido a su excesiva tolerancia y peso decidió aligerarse el modelo. Procedimos a hacer una cáscara al diseño, es decir, vaciarlo. El aspecto exterior es el mismo, pero las tensiones máximas soportadas eran más acordes a las exigencias que finalmente el modelo real iba a sufrir.

El tercer modelo se modeló partiendo de la base del ejemplo macizo; se crearon unos taladros para aligerar el original; pueden verse los resultados en la figura 88.

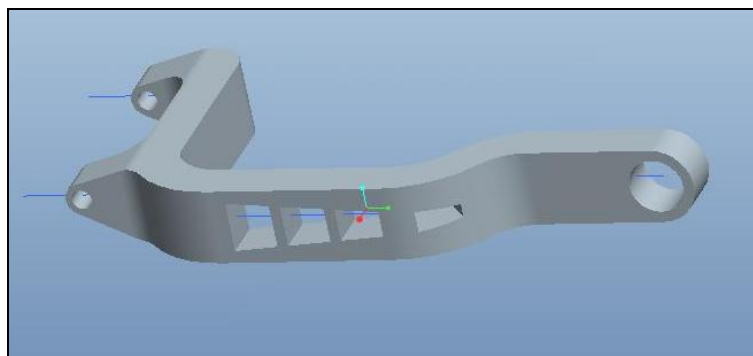


Figura 88. Modelo 2 de basculante monobrazo

Debido a la peligrosidad de sus bordes angulosos, se procedió a redondear los de ambos diseños como se señala en las figuras 89 y 90. Los resultados de tensión apenas variaron, pero era un retoque necesario para la seguridad del piloto.

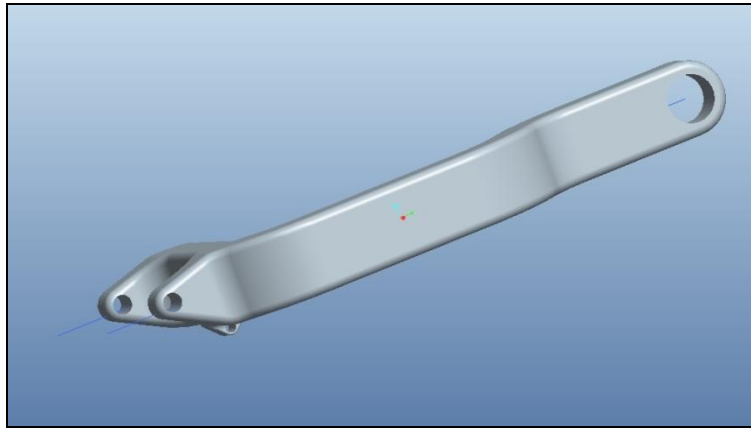


Figura 89. Modelo 1 con fillos redondeados

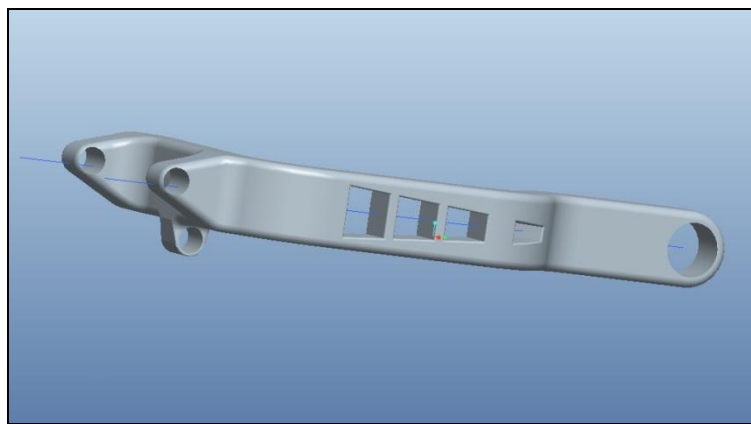


Figura 90. Modelo 2 con fillos redondeados

También se realizó un cambio en el diámetro existente para el eje trasero, ya que la VFR 800 monta un eje más grande debido a que tiene una llanta especial, pero en este caso, hemos tenido que acoplar la llanta proporcionada por la organización a este basculante.

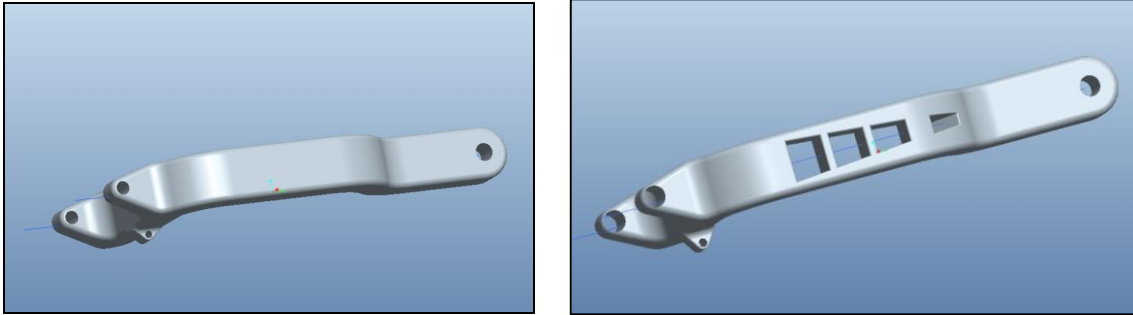


Figura 91. Modelos con correcciones aplicadas

Para acoplar la llanta a los requerimientos del basculante monobrazo, se ha tenido que diseñar una serie de piezas especiales. Para ello se realizó con anterioridad un esquema de la disposición de las piezas básicas como son la corona, el disco de freno y la rueda dentro del conjunto. Una vez colocadas en el croquis, se vió que haría falta un soporte para la pinza de freno específico y separadores tanto para la corona como para el disco de freno.

El soporte de la pinza fue diseñado a partir de las cotas del disco.

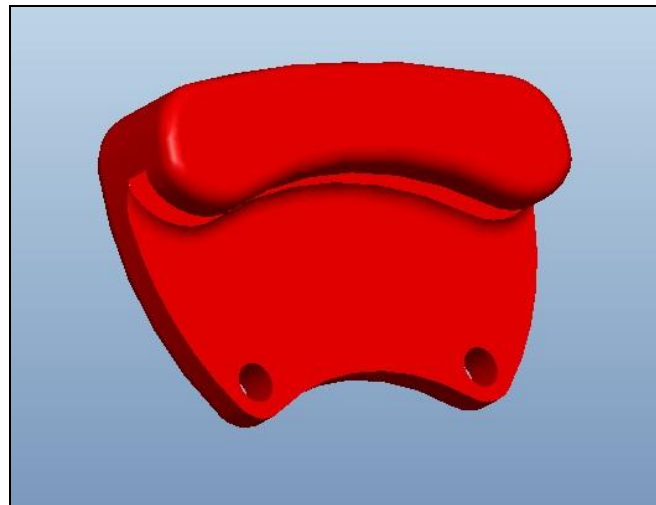


Figura 92. Soporte de pinza

Así como los separadores diseñados tanto para la corona como para el disco, los cuales se esbozaron con las cotas exactas que su homónimo. El trazo seguido fue inspirado por la forma de los bujes estándares.

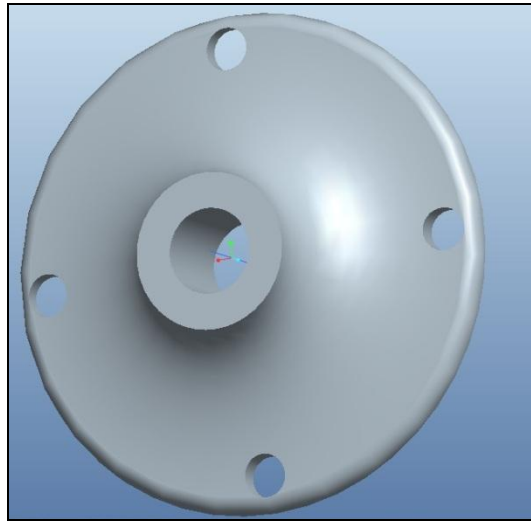


Figura 93. Separador corona

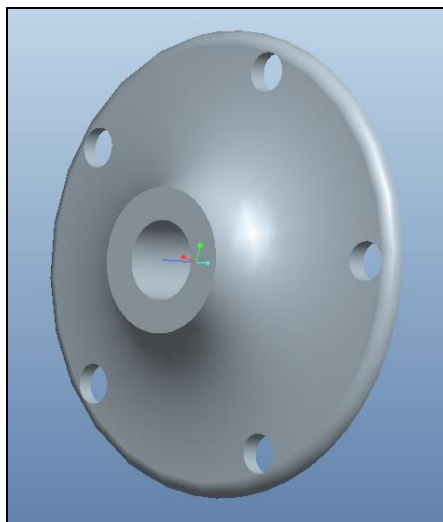


Figura 94. Separador disco

Así obtuvimos los siguientes conjuntos:

Basculante monobrazo 1:

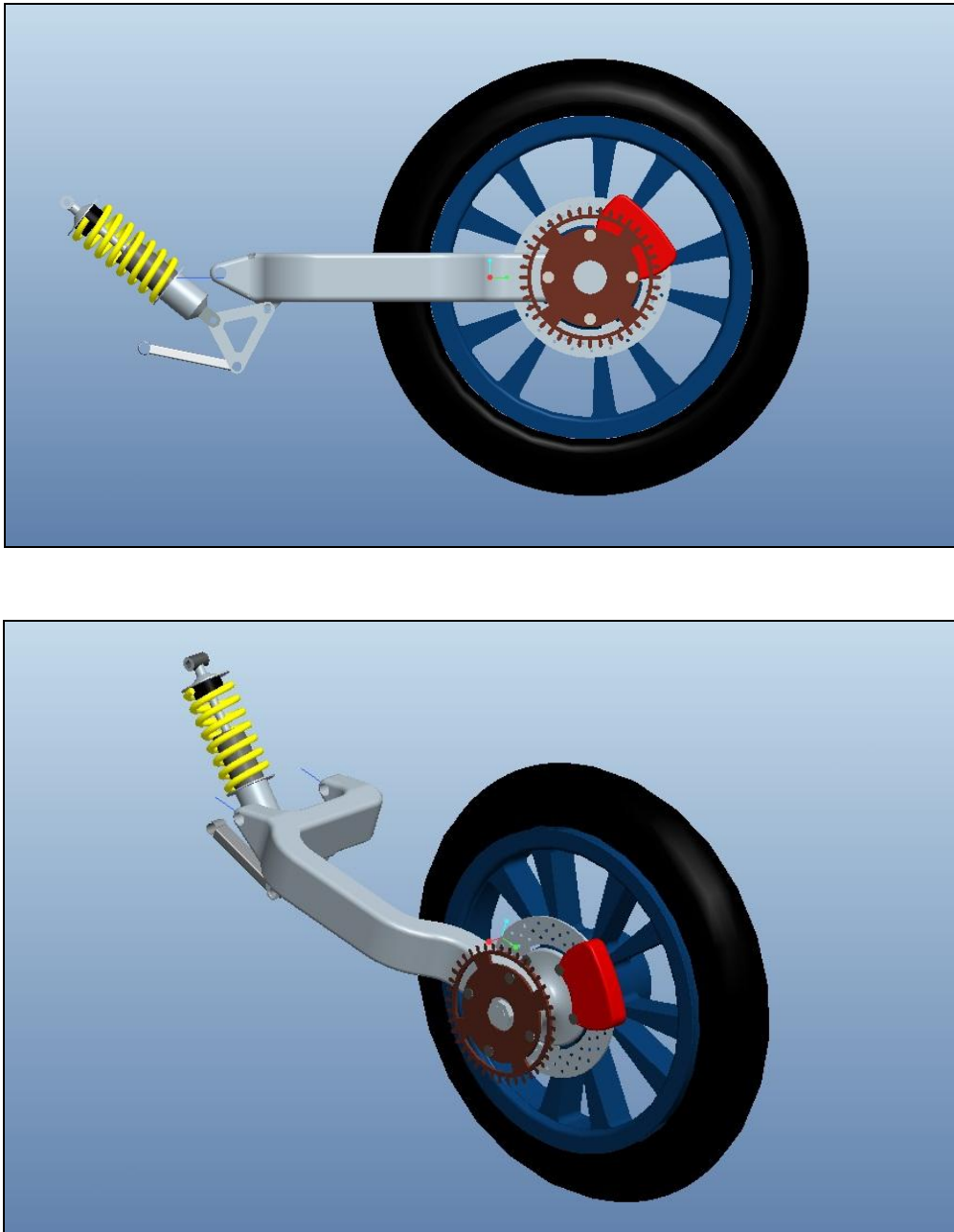


Figura 95. Conjunto con modelo de basculante 1

Basculante monobrazo 2:

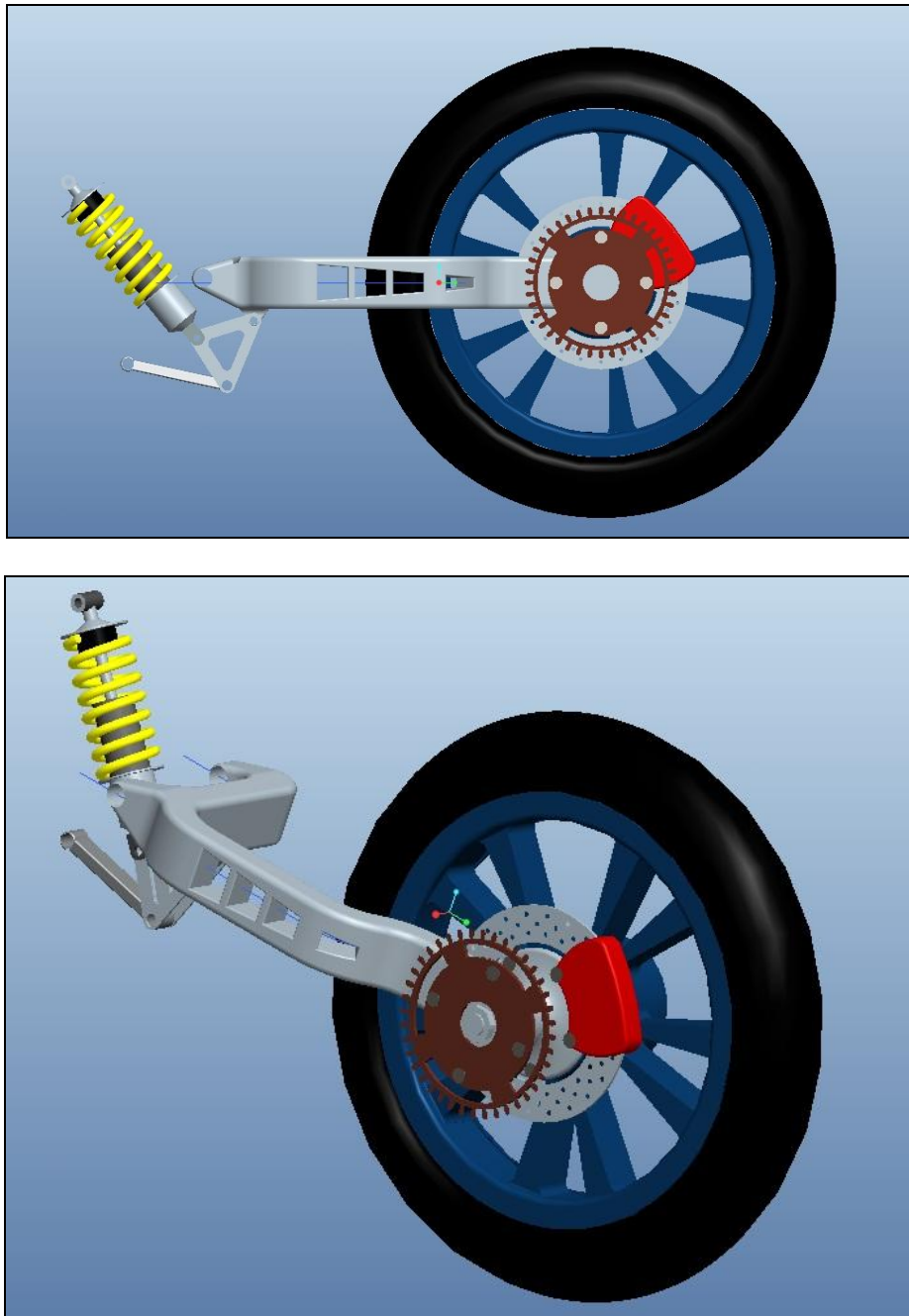


Figura 96. Conjunto con modelo de basculante 2

6.4. Análisis de modelos finales

Analizaremos tres modelos diferentes:

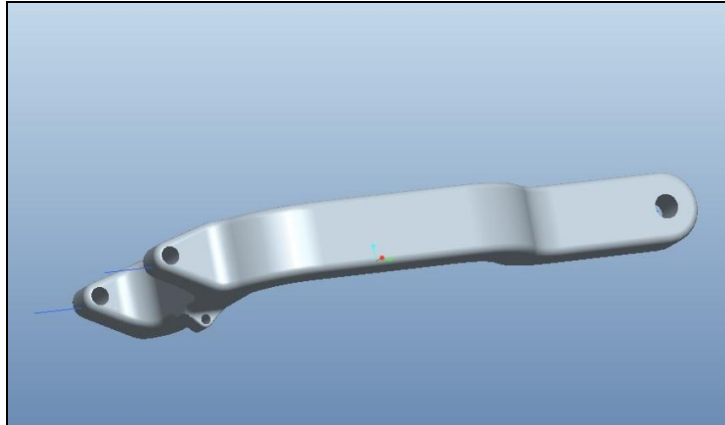


Figura 97. Modelo 1a: Basculante macizo

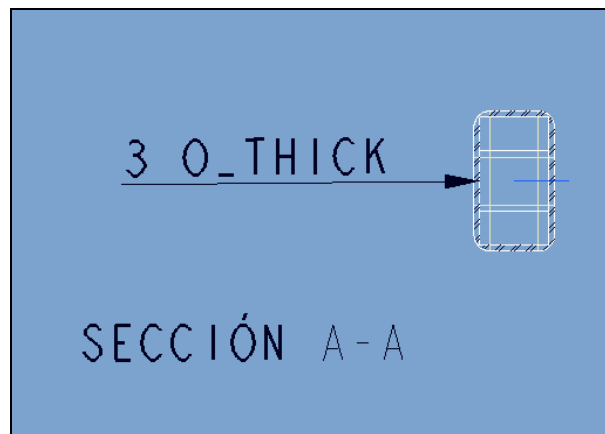


Figura 98. Modelo 1b: Pieza igual que la anterior pero con pared de 0,5 mm de espesor

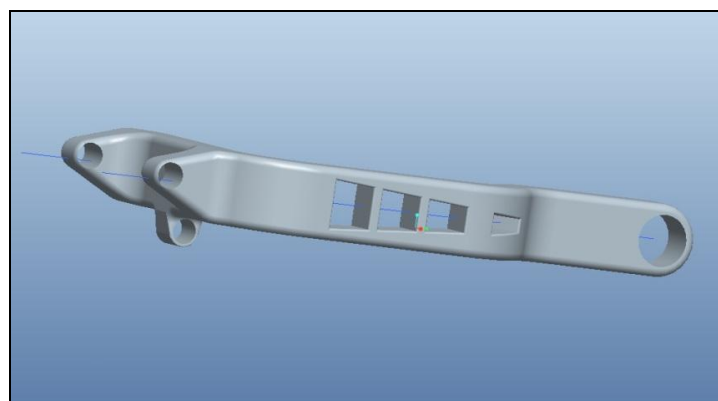


Figura 99. Modelo 2: Basculante macizo aligerado

6.4.1. Análisis de pesos y precios

Primero observaremos los pesos que tendrá nuestra pieza con diferentes materiales para poder analizar posteriormente el basculante con el material que tenga el peso óptimo.

Peso (kg) \	Densidad Tm/mm ³	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Acero	7.82e-09	15,23	3,78	13,8	3,14
Titanio	4,507e-09	8,77	2,17	7,95	1,81
Aluminio	2,698e-09	5,44	1,35	4,93	1,12
Magnesio	1,738e-09	3,38	0,84	3	0,7

Tabla 1. Peso de los modelos con diferentes materiales

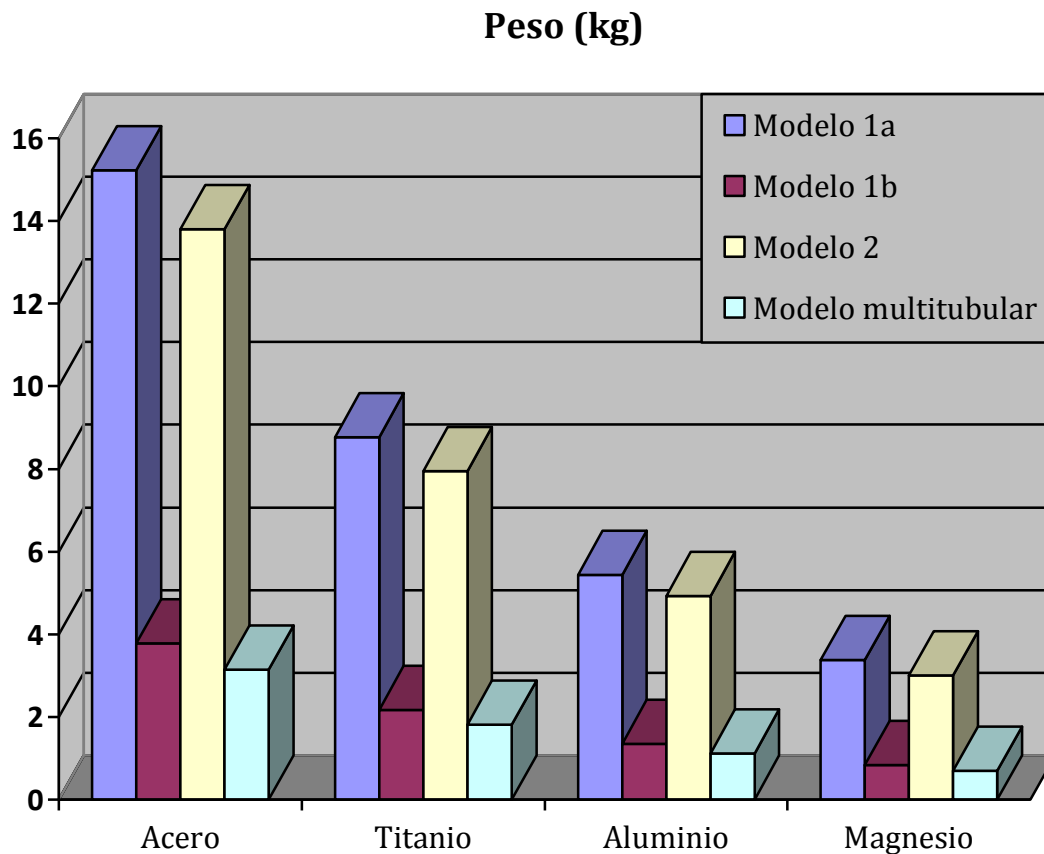


Figura 100. Gráfica peso

Otro aspecto fundamental para la fabricación del basculante es el precio del material.

	Precio €/kg	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Acero	2,30	35€	8,7€	31,7€	7,22€
Titanio	5,73	50,25€	12,43€	45,55€	10,71€
Aluminio	4,20	22,85€	5,67€	20,7€	4,7€
Magnesio	10,64	35,96€	8,93€	31,92€	7,45€

Tabla 2. Precio de la materia prima utilizando diferentes materiales

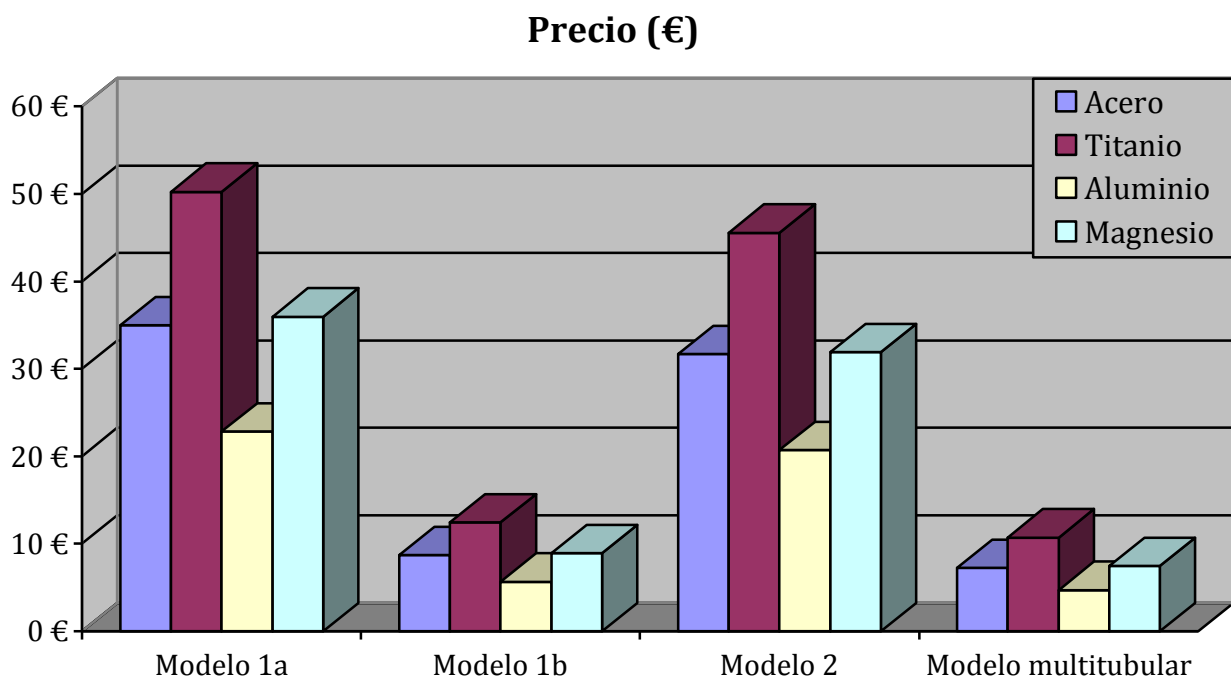


Figura 101. Gráfica precio

Con la anterior información, llegamos a las siguientes conclusiones:

- El titanio queda excluido por estar prohibido por organización para la fabricación del tanto del bastidor como del basculante.
- El magnesio tiene un coste demasiado elevado, por tanto, también lo descartaremos.
- Entre el acero y el aluminio, se ha escogido el acero, debido a la dificultad que tiene el aluminio para ser soldado.

6.4.2. Análisis del modelo 1a

El modelo 1.1, es una pieza maciza. Una vez determinadas las restricciones y cargas, analizaremos el diseño para saber cuál es su estado tensional y los valores de deformación, los cuales compararemos posteriormente entre ellos.

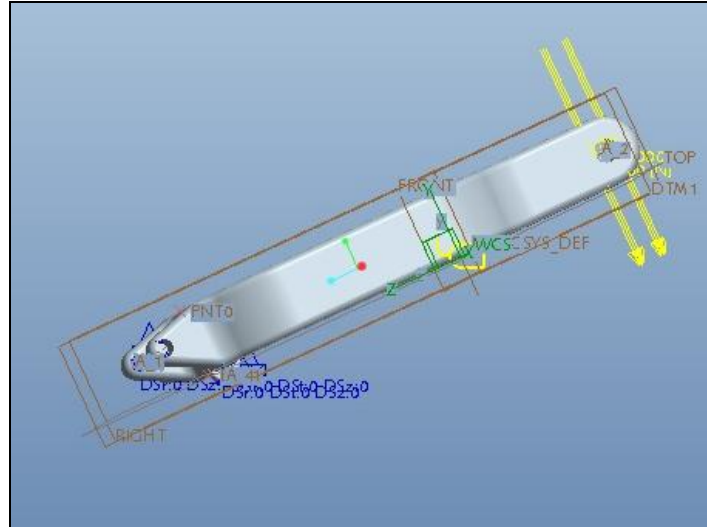


Figura 102. Restricciones y cargas del basculante 1a

• Análisis tensional

Se ha analizado la pieza según el criterio de Von Mises. Como meta principal en esta simulación está el asegurarnos de que el material no alcanza el límite elástico, evitando así la plastificación de la pieza. El límite elástico utilizado no es el real sino que, para evitar cualquier tipo de plastificación, rotura o grieta, hemos contado con un coeficiente de seguridad de 1,2, es decir, no ha de sobrepasar los 1020 MPa.

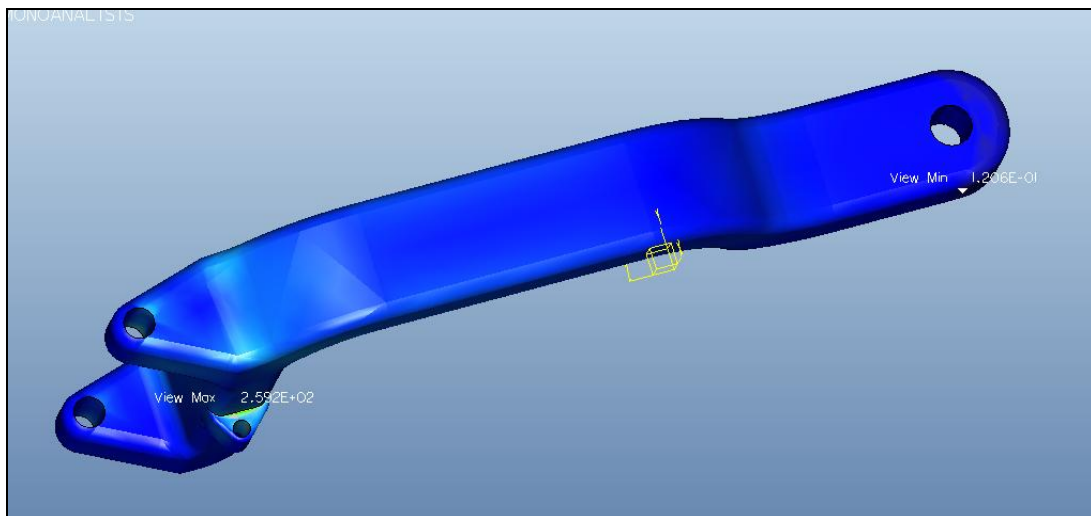


Figura 103. Valores de tensión del basculante 1a

Según la leyenda del gráfico (cuyos valores se muestran en MPa) el color rojo, el cual corresponde al valor máximo de tensión al que la pieza está sometida en el estado de carga simulado, es de 259 MPa, y dado que el valor del límite elástico para el acero empleado en la estructura, contando con el coeficiente de seguridad, asciende a 1020 MPa, se puede concluir que nos alejamos mucho de la zona de plasticidad.

En alguno de los análisis, hemos encontrado picos de tensión que superaban el límite elástico; para localizar exactamente tanto la distribución real de tensiones como dónde se daba dicho valor, se modificó la escala de la leyenda de tal forma que el valor máximo de la misma sea el límite elástico del material, y por tanto, todo punto que supere ese valor aparecería en el gráfico de color rojo. Entonces observábamos que los puntos que superaban el límite elástico se encontraban en los postizos de aplicación de carga pero no en el propio basculante, por lo que el estudio respecto a tensiones se consideró válido.

Hemos decidido acotar la leyenda dando un valor máximo de 50 MPa, y de mínimo, 1 MPa. Así obtenemos el gráfico de la figura 104, donde podemos observar que los valores máximos se encuentran en la soldadura del soporte de la bieleta y en los taladros que soportan el eje.

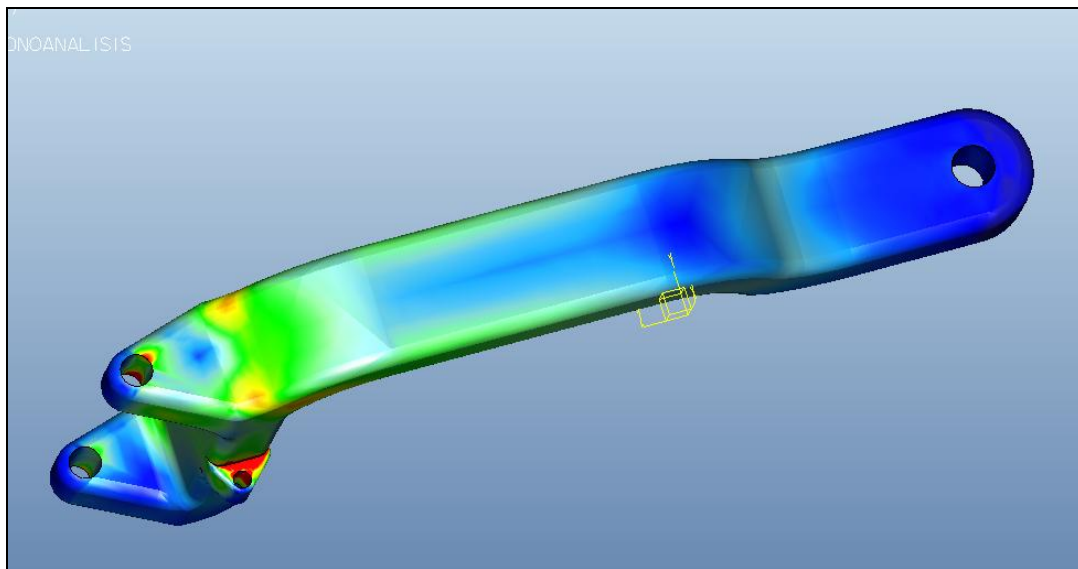


Figura 104. Valores de tensión del basculante 1a

• Análisis de deformaciones

El estudio de los desplazamientos en la estructura tiene un interés meramente informativo; nos servirá para cuantificar los movimientos de las diferentes partes de la pieza y comprobar que no choca con ninguna pieza colindante. Hemos estudiado los movimientos respecto de los tres posibles ejes, los cuales tienen la orientación observada en la figura 105.

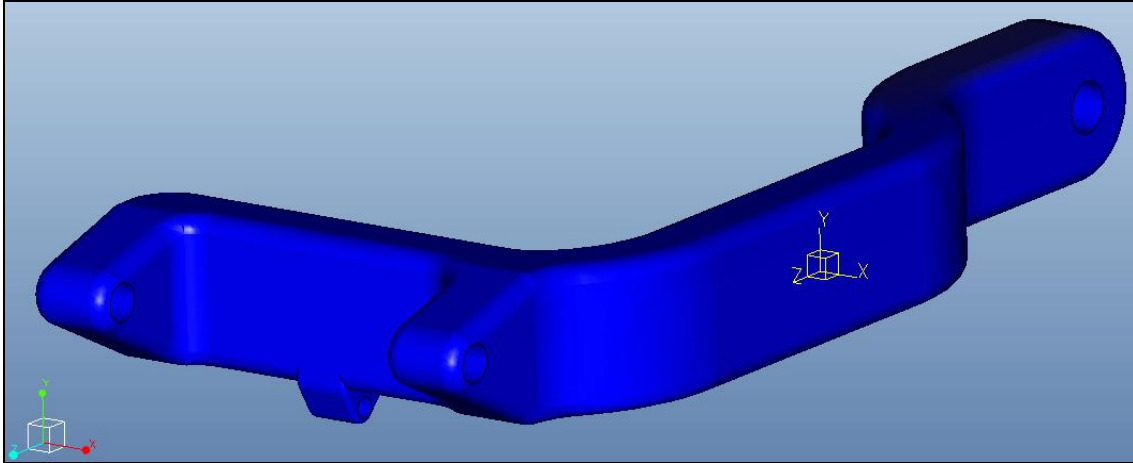


Figura 105. Visualización de los ejes

Los resultados obtenidos son los siguientes. El color rojo representa el máximo y el azul el mínimo. Tomaremos el valor máximo como el superior de ambos en módulo, es decir, sin contar con el signo.

$$\left. \begin{array}{l} \text{- Eje X} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Valor máximo: } 0,0576 \text{ mm} \\ \text{Valor mínimo: } -0,0079 \text{ mm} \end{array}$$

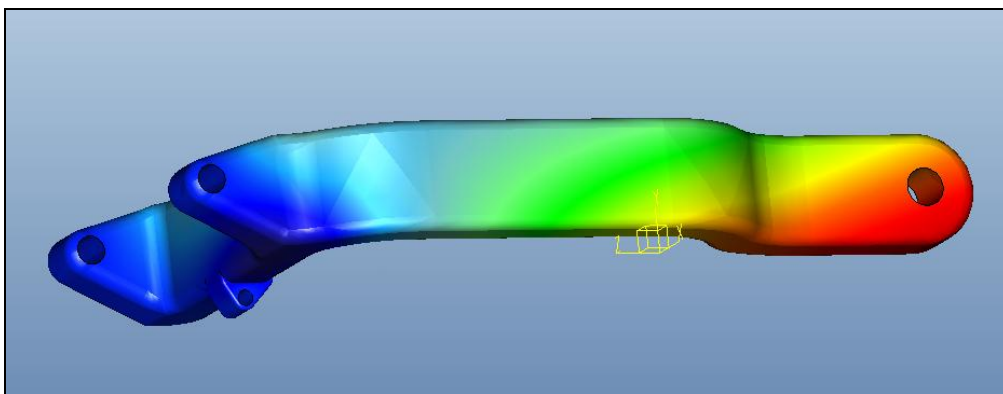


Figura 106. Valores de deformación en X del basculante 1a

- Eje Y } Valor máximo: 0,0095 mm
Valor mínimo: -0,0699 mm

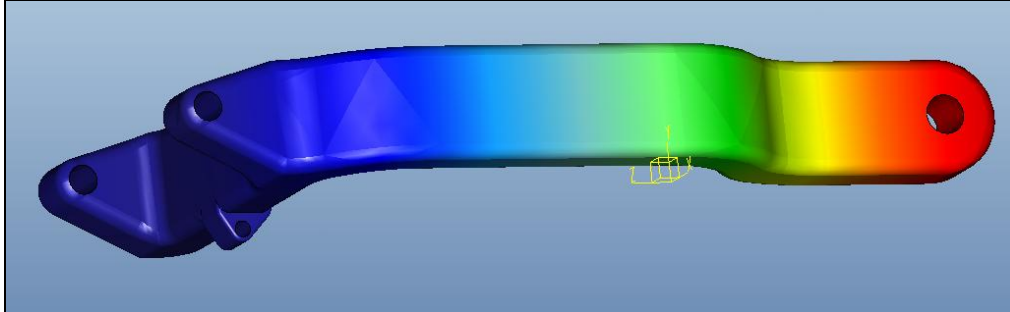


Figura 107. Valores de deformación en Y del basculante 1a

- Eje Z } Valor máximo: 0,062 mm
Valor mínimo: -0,061 mm

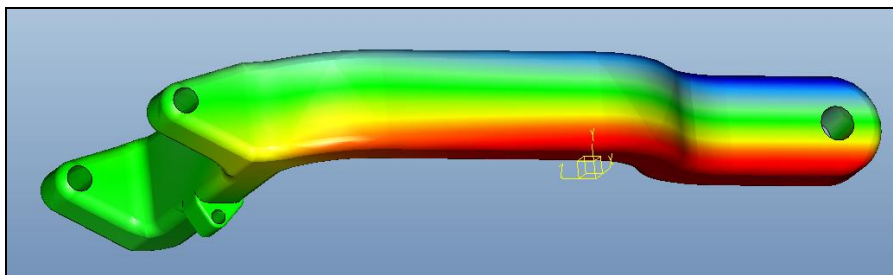


Figura 108. Valores de deformación en Z del basculante 1a

Las deformaciones en todos los ejes, son de orden de centésimas; por tanto, consideraremos dichos valores admisibles.

6.4.3. Análisis del modelo 1b

El modelo 1.2, es muy similar al anterior analizado; simplemente cambia en que se ha creado una cáscara de 0,5 mm de espesor. Esto le restará peso y resistencia. Seguiremos los mismos pasos llevados a cabo en el modelo anterior. Las restricciones y cargas serán las mismas para todos los modelos.

- **Análisis tensional**

También utilizando el criterio de Von Mises y tomando como límite elástico el valor de 1020 MPa, abriremos el módulo Mechanics para observar las tensiones a las que es sometida nuestra pieza.

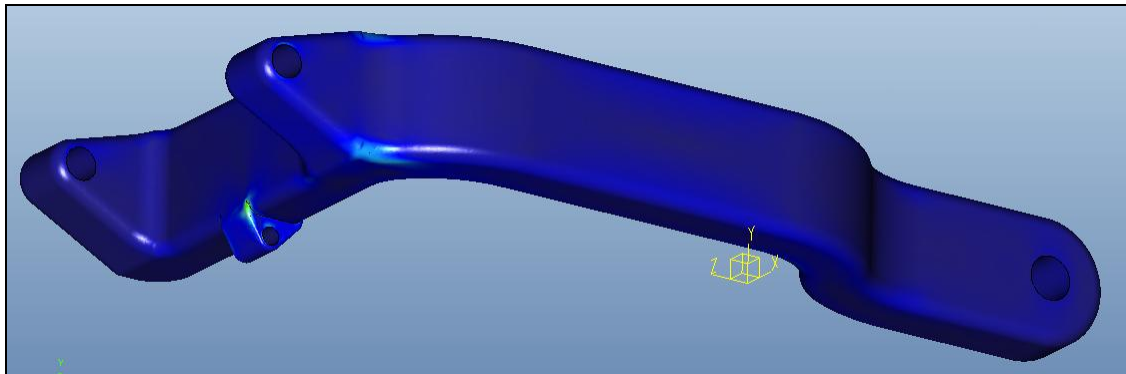


Figura 109. Valores de tensión del basculante 1b

La leyenda nos da un valor máximo de 15540 MPa, el cual si hacemos zoom en la región donde se encuentra, podemos observar que es un pico de tensión en la parte donde se une el soporte de la bieleta con el basculante. Cambiaremos la escala para poder ver si se trata meramente de un pico de tensión generado por el programa erróneamente. Daremos como valor máximo el límite elástico, es decir, 1020MPa y de mínimo 500 MPa.

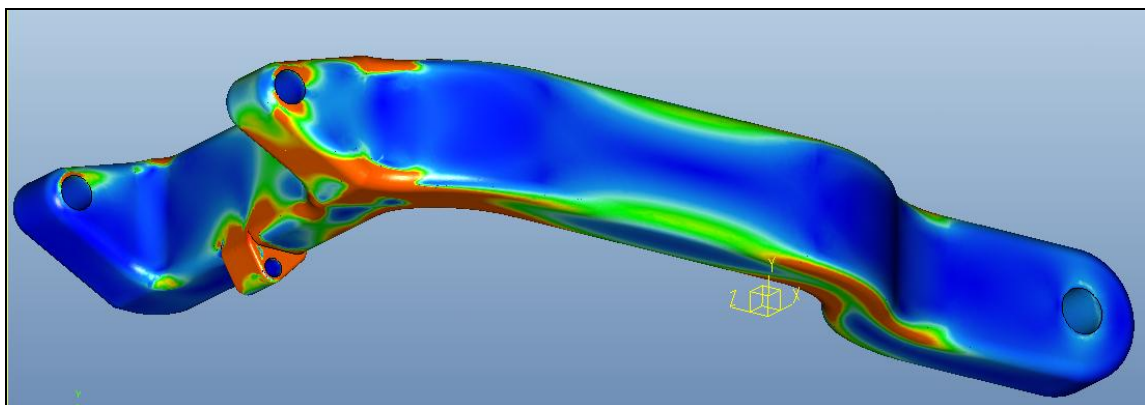


Figura 110. Valores de tensión del basculante 1b

Como podemos observar en la figura 110, el color rojo es inexistente. Las zonas de color anaranjado, están sometidas a valores cercanos al límite de plastificación, pero, únicamente pequeños puntos de unión de la estructura son los que lo sobrepasan. Por ello, lo consideraremos un fallo del programa ya que la unión

entre ambos no es la exacta y consideraremos dicha pieza como válida en cuanto a valores de tensión.

• Análisis de deformaciones

Los ejes de este modelo están orientados exactamente igual que en el anterior.

Los resultados obtenidos son los siguientes. El color rojo representa el máximo y el azul el mínimo. Tomaremos el valor máximo como el superior de ambos en módulo, es decir, sin contar con el signo.

- Eje X } Valor máximo: 5,56 mm
Valor mínimo: -1,6 mm

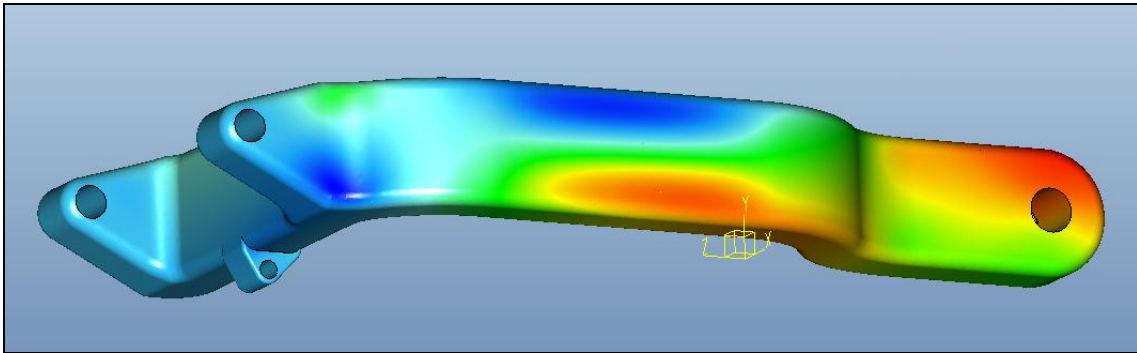


Figura 111. Valores de deformación en el eje X del basculante 1b

- Eje Y } Valor máximo: 0,97 mm
Valor mínimo: -50 mm

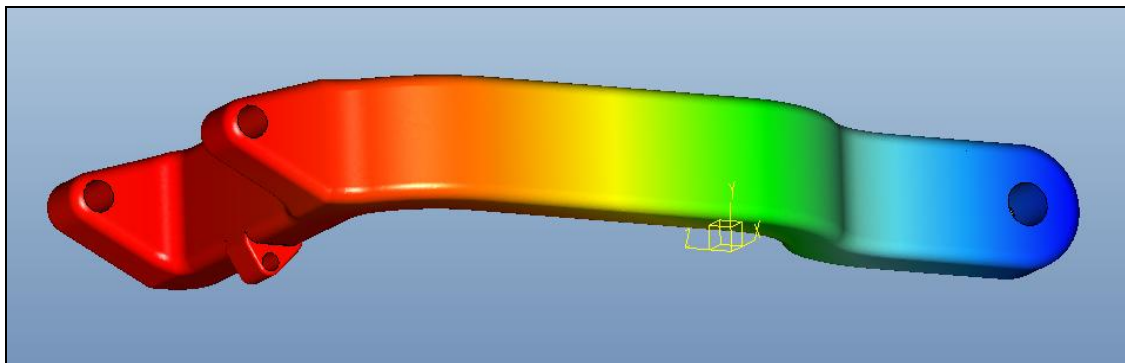


Figura 112. Valores de deformación en el eje Y del basculante 1b

- Eje Z } Valor máximo: 5,564 mm
Valor mínimo: -5,495 mm

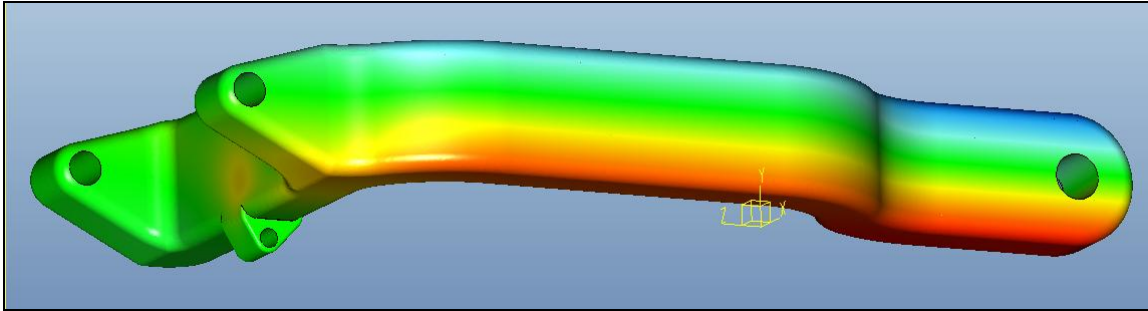


Figura 113. Valores de deformación en el eje Z del basculante 1b

6.4.4. Análisis del modelo 2

Tratándose de una optimización del modelo 1.2, en este diseño hemos tratado de aligerar el conjunto añadiendo unas ventanas en la zona central del brazo del basculante como podemos observar en la figura X.

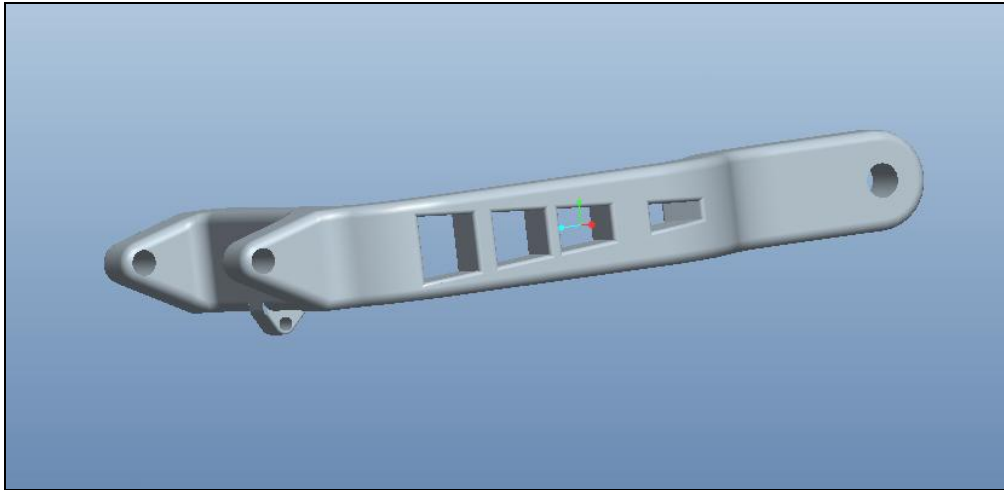


Figura 114. Modelo de basculante 2

Después de llevar a cabo el análisis para este modelo vimos que no resistía, así que lo solucionamos partiendo del basculante 1.1, es decir, el macizo y creando las mismas ventanas abiertas en el modelo anterior. Queríamos observar si los picos de tensión que alcanzaba ahora la pieza y la flexión de la misma, distaban mucho de los valores del modelo inicial. Procedimos a restringir los movimientos y cargar la pieza con el mismo procedimiento llevado a cabo anteriormente.

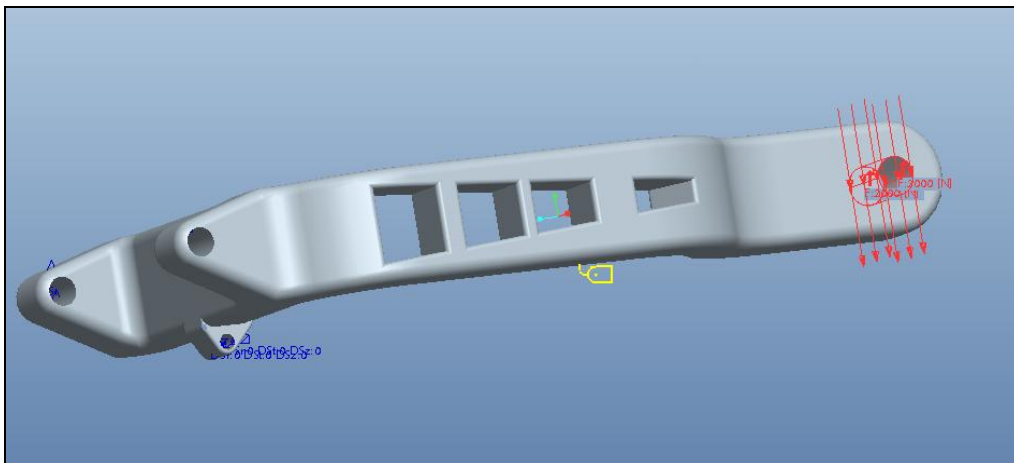


Figura 115. Restricciones y cargas del modelo 2

- **Análisis tensional**

Los valores obtenidos utilizando el criterio de Von Mises nos revirtieron los siguientes resultados:

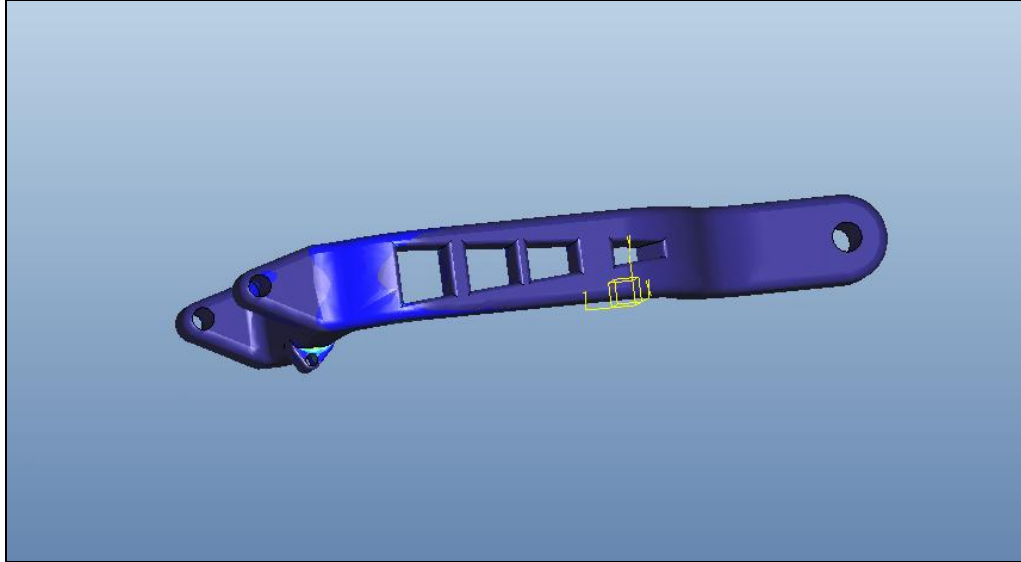


Figura 116. Tensiones del modelo 2

La leyenda nos da un valor máximo de 232 MPa y un mínimo de 26 MPa. Haciendo zoom en la región donde se encuentra el máximo, podemos observar que es un pico de tensión en la parte donde se une el soporte de la bieleta con el basculante. Cambiaremos la escala para poder ver la extensión real de dicha tensión. Daremos como valor máximo 50 MPa y de mínimo 1 MPa, así podremos observar el verdadero comportamiento de la pieza.

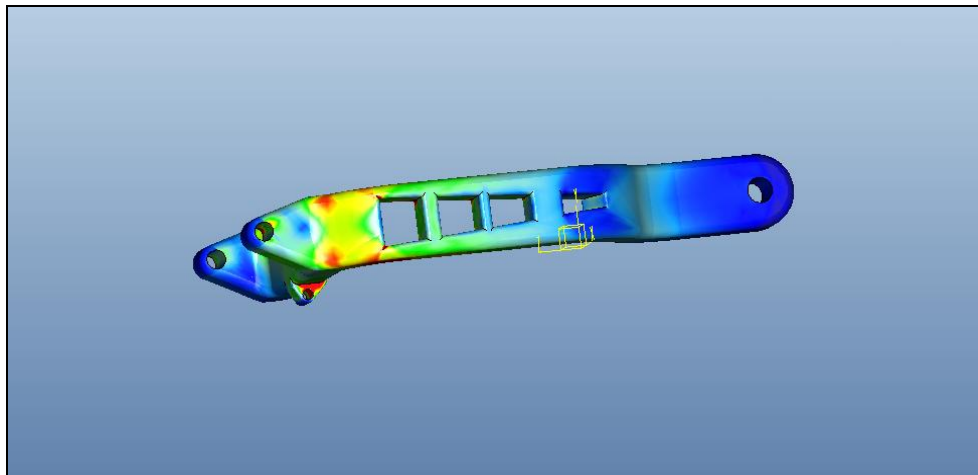


Figura 117. Tensiones del modelo 2

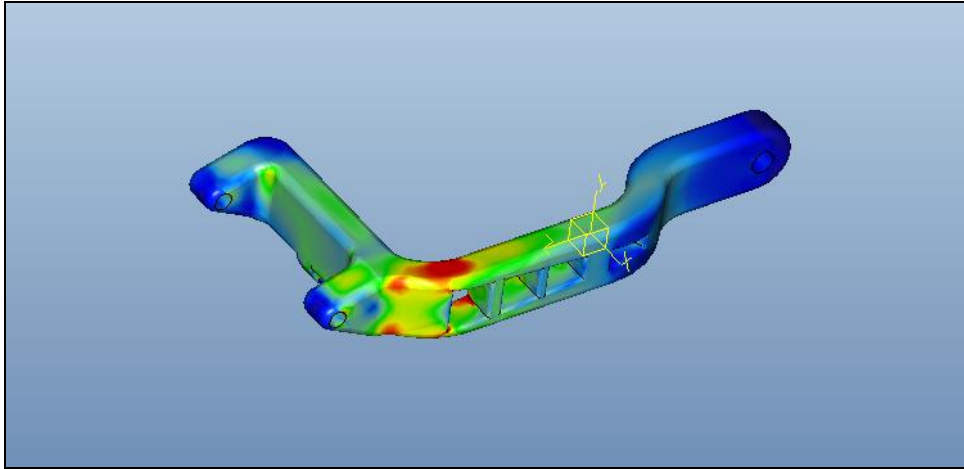


Figura 118. Tensiones del modelo 2

Vemos que, en comparación con el modelo 1a, el cual estaba sometido a una tensión máxima de unos 259 MPa, este modelo tiene un pico de 232 MPa. Hemos conseguido rebajar ligeramente la tensión.

• Análisis de deformaciones

Los ejes de este modelo están orientados exactamente igual que en el anterior.

Los resultados obtenidos son los siguientes. El color rojo representa el máximo y el azul el mínimo. Tomaremos el valor máximo como el superior de ambos en módulo, es decir, sin contar con el signo.

$$\begin{array}{l} \text{- Eje X} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor máximo: } 0,084\text{mm} \\ \text{Valor mínimo: } -0,012 \text{ mm} \end{array} \right.$$

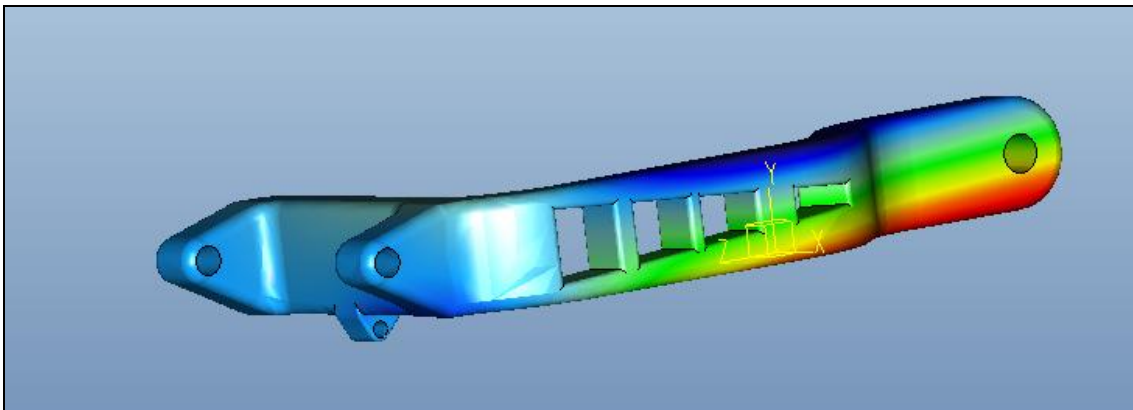


Figura 119. Valores de deformación en el eje X del basculante 2

$$\begin{array}{l} \text{- Eje Y} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Valor máximo: } 1,49 \cdot 10^{-8} \text{ mm} \\ \text{Valor mínimo: } -0,8 \text{ mm} \end{array} \right.$$

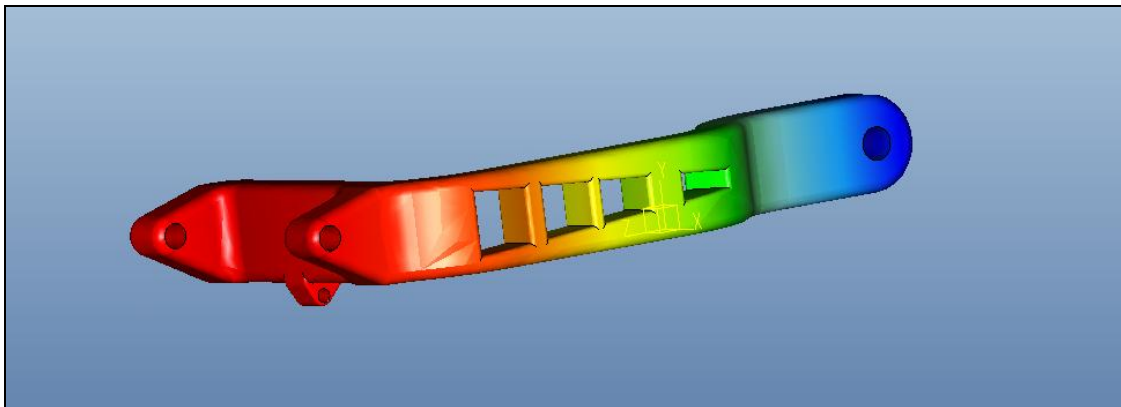


Figura 120. Valores de deformación en el eje Y del basculante 2

- Eje Z } Valor máximo: 0,055 mm
Valor mínimo: -0,053 mm

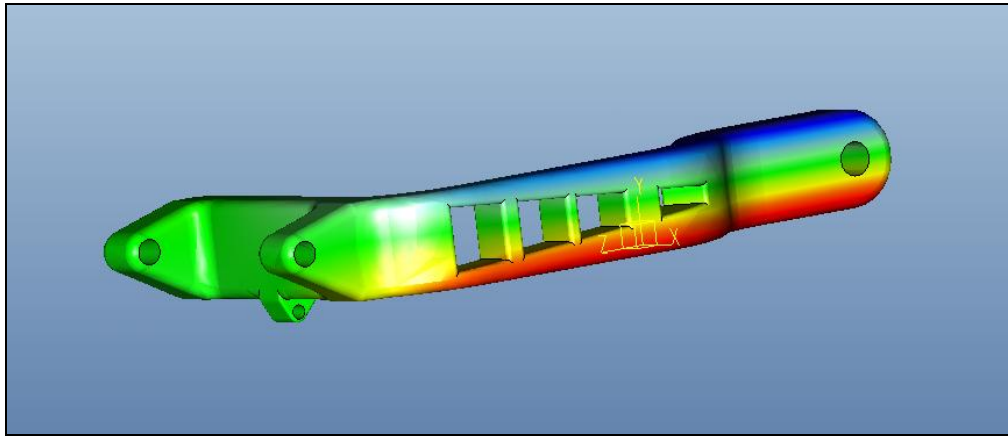


Figura 121. Valores de deformación en el eje Z del basculante 2

6.4.5. Análisis del modelo multitubular

Este modelo ha sido diseñado paralelamente por otro grupo de trabajo. Han sido necesarios varios pasos hasta poder llegar a esta pieza. La analizaremos para observar los pros y contras del basculante monobrazo.

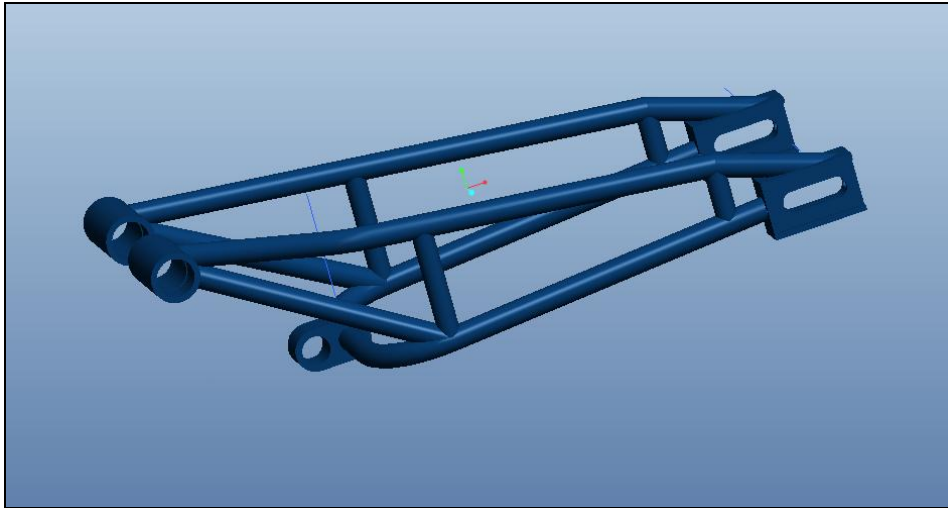


Figura 122. Diseño del basculante multitubular

Después de llevar a cabo el análisis para este modelo vimos que no resistía, así que lo solucionamos partiendo del basculante macizo y creando las mismas ventanas abiertas en el modelo anterior. Queríamos observar si los picos de tensión que alcanzaba ahora la pieza y la flexión de la misma, distaban mucho de los valores del modelo inicial. Procedimos a restringir los movimientos y cargar la pieza con el mismo procedimiento llevado a cabo anteriormente.

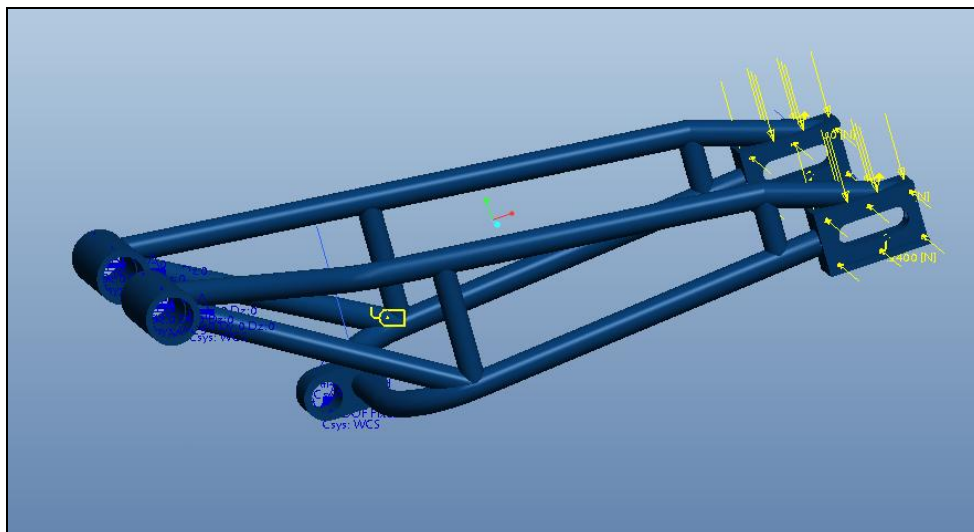


Figura 123. Restricciones y cargas del basculante multitubular

- **Análisis tensional**

Los valores obtenidos utilizando el criterio de Von Mises nos revirtieron los siguientes resultados:

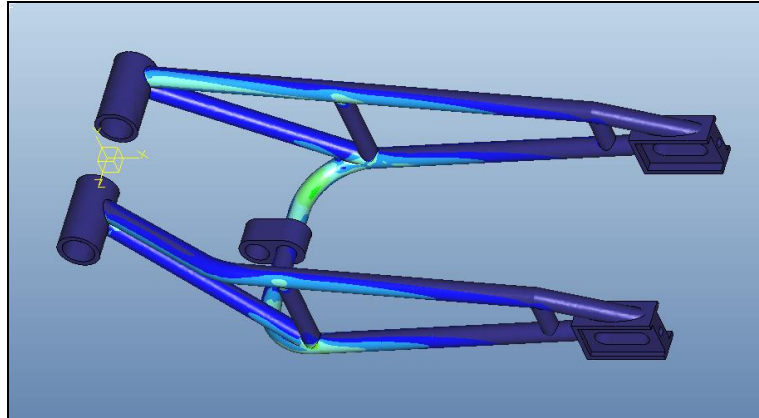


Figura 124. Tensiones del basculante multitubular

La leyenda nos da un valor máximo de 1069 MPa y un mínimo de 118 MPa, por tanto, nuestra pieza no entra en la zona de plastificación. Podemos ubicar la tensión máxima en el punto de encuentro de las tres soldaduras.

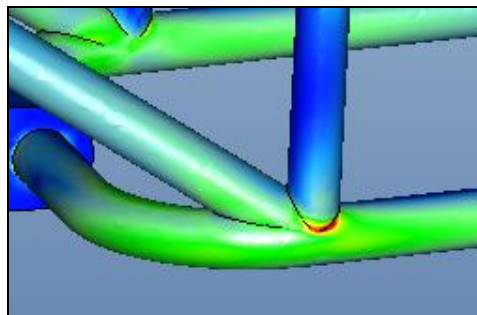


Figura 125. Pico de tensión del basculante multitubular

Cambiando la escala con un rango de 0 a 1000 MPa, observamos mejor el comportamiento de la pieza:

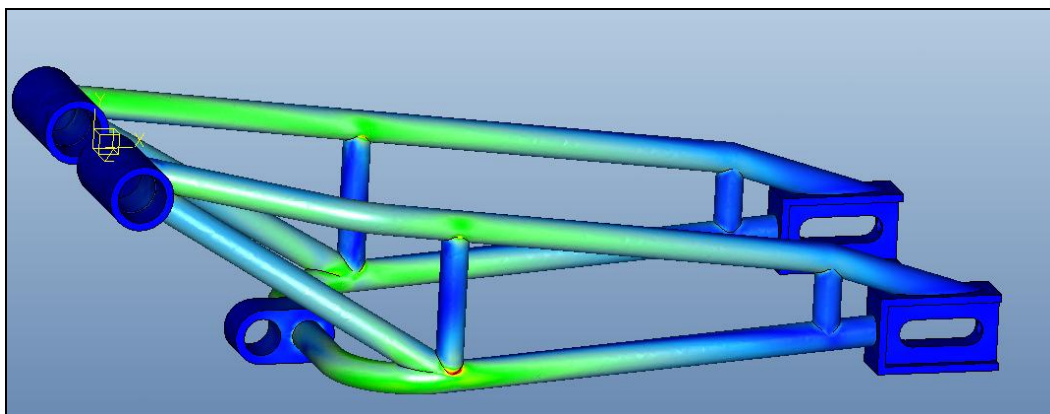


Figura 126. Tensión del basculante multitubular reescalada

• Análisis de deformaciones

Los ejes de este modelo están orientados exactamente igual que en los modelos anteriores.

Los resultados obtenidos son los siguientes. El color rojo representa el máximo y el azul el mínimo.

- Eje X } Valor máximo: 0,17 mm
 Valor mínimo: -1,08 mm

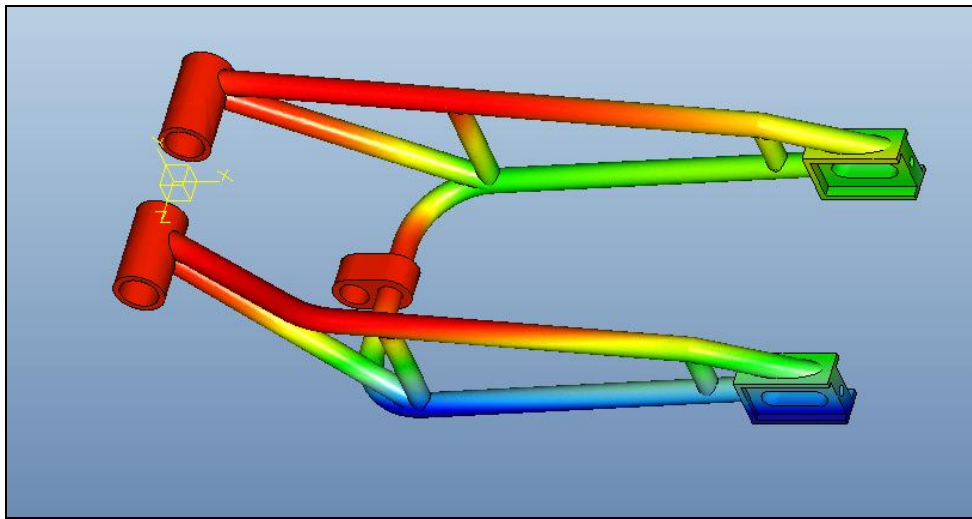


Figura 127. Valores de deformación en el eje X del basculante multitubular

- Eje Y } Valor máximo: 0,003 mm
 Valor mínimo: -5,44 mm

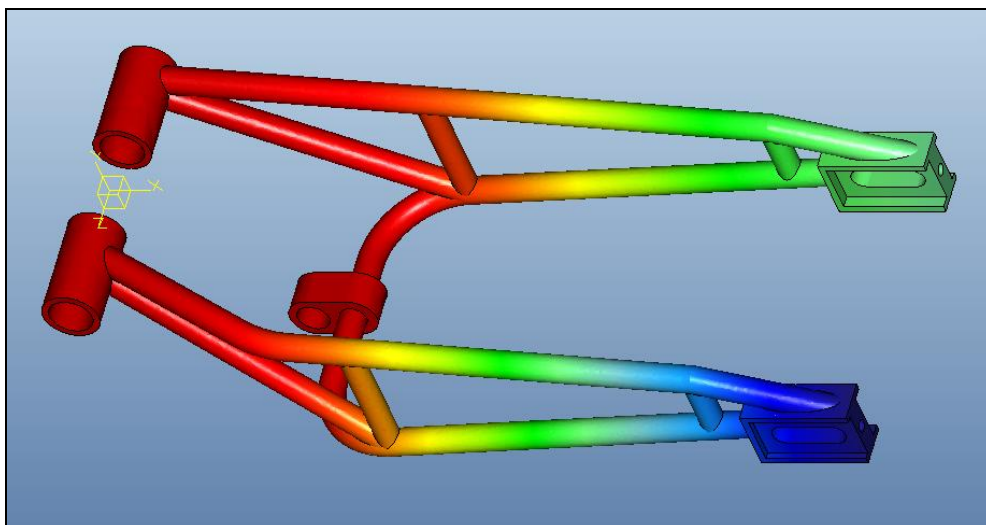


Figura 128. Valores de deformación en el eje Y del basculante multitubular

- Eje Z } Valor máximo: 3,05 mm
Valor mínimo: -3,63 mm

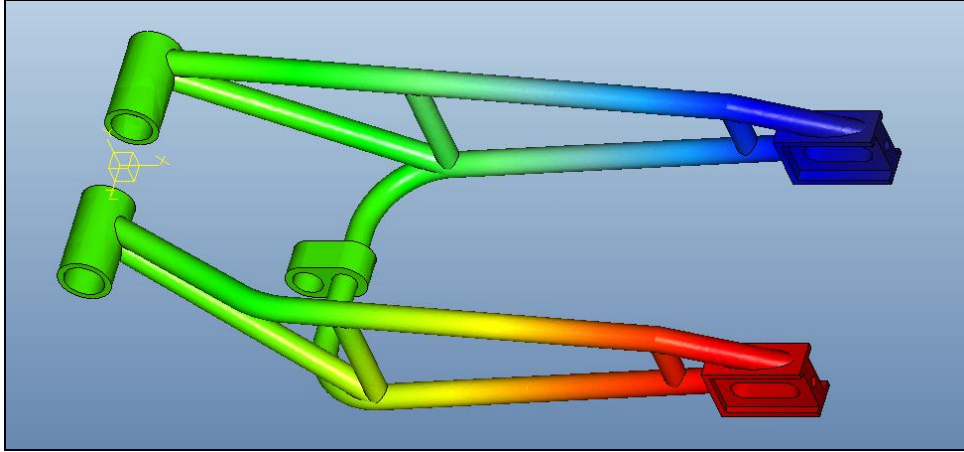


Figura 129. Valores de deformación en el eje Z del basculante multitubular

6.5. Comparación de resultados

De forma paralela al diseño de los diferentes basculantes monobrazo, se implementaron otros de carácter multitubular, de los cuales fue escogido el de la figura 122 debido a que es el que mejores prestaciones ofrece de entre todos los modelos esbozados. Una vez analizados los diferentes modelos a estudio, se compararán para observar realmente las diferencias entre las prestaciones de los mismos.

También tendremos en cuenta las elecciones anteriormente estudiadas en el punto 7.3.1 sobre el material, el peso y el precio.

También se escogió un diseño multitubular, el cual sería más fácil de llevar a cabo debido al patrocinio de Reynolds.

6.5.1. Tensión

	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Tensión máx. (MPa)	259	1020	232	1069

Tabla 3. Tensión máxima de los modelos en acero

Comparando ambos basculantes monobrazo, llegamos a la conclusión de que el modelo 2 da mejores resultados que el 1. La tensión máxima a la que la pieza está sometida, ronda el 50% de la del primer modelo. En cuanto a las deformaciones, la única superior en el modelo macizo es en el eje X, la cual es totalmente compensada con los otros dos ejes ya que estamos hablando de diferencias de órdenes de 10^{-3} mm.

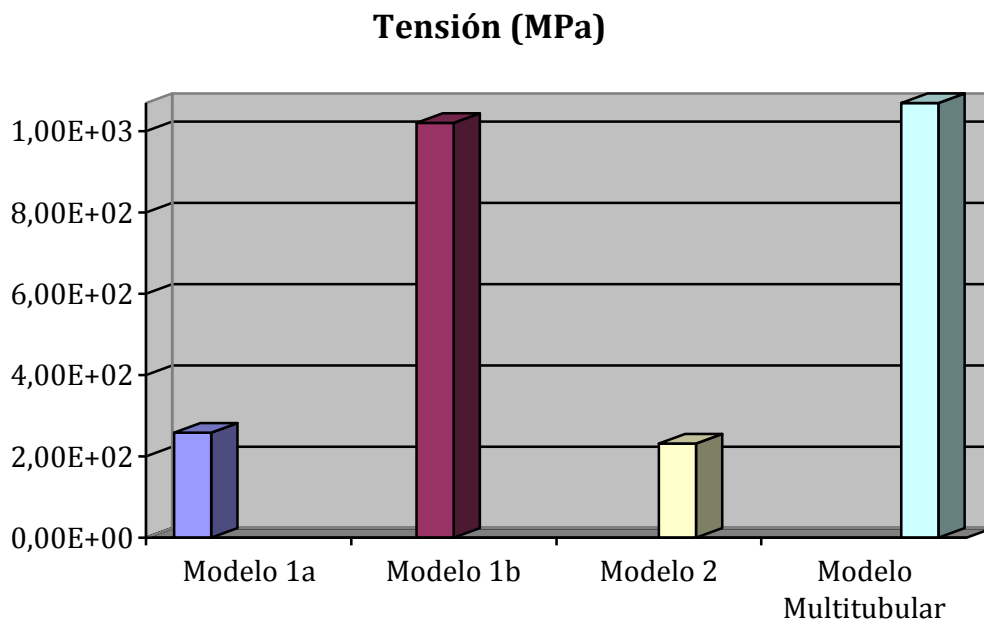


Figura 130. Gráfica comparativa de tensión máxima en un punto cualquiera entre modelos de acero

6.5.2. Desplazamientos

Para comparar las diferencias entre ambos modelos, se ha creado una tabla con los valores de las gráficas. Dichos valores serán insertados en la tabla en valor absoluto.

	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Desp. máx. en X (mm)	0,0576	5,56	0,084	-1,08
Desp. máx. en Y (mm)	-0,0699	-50	-0,8	-5,44
Desp. máx. en Z (mm)	0,062	5,56	0,055	-3,63

Tabla 4. Desplazamientos de los modelos en acero

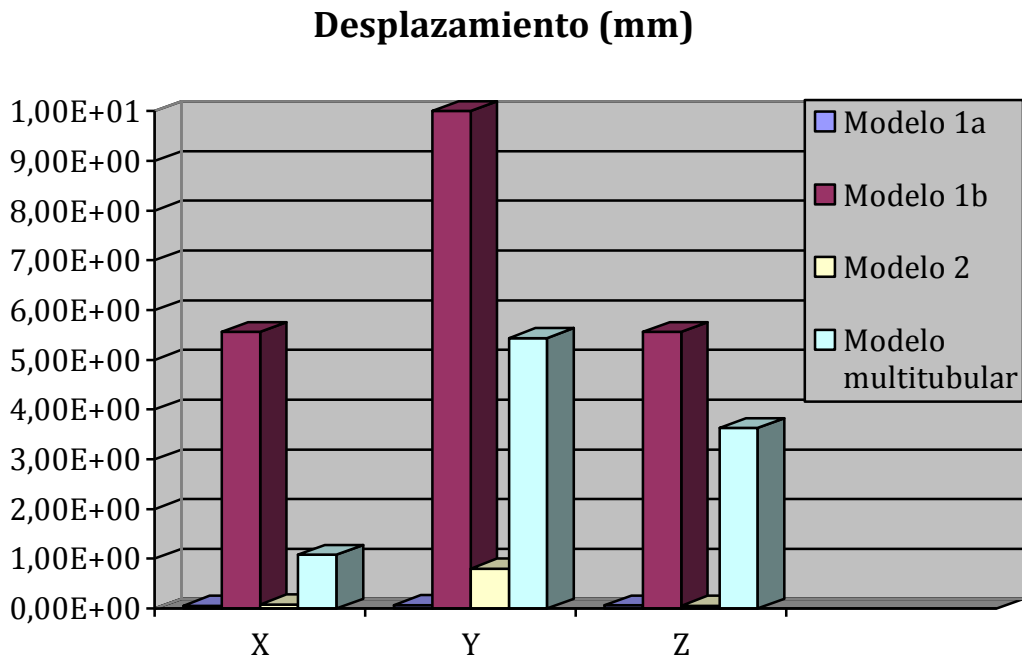


Figura 131. Gráfica comparativa de desplazamiento entre modelos de acero

Se ha acotado el máximo a 10 mm aunque haya un máximo de 50 mm para poder ver el resto de parámetros.

6.5.3. Peso

	Densidad Tm/mm ³	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Acero	7.82e-09	15,23	3,78	13,8	3,14

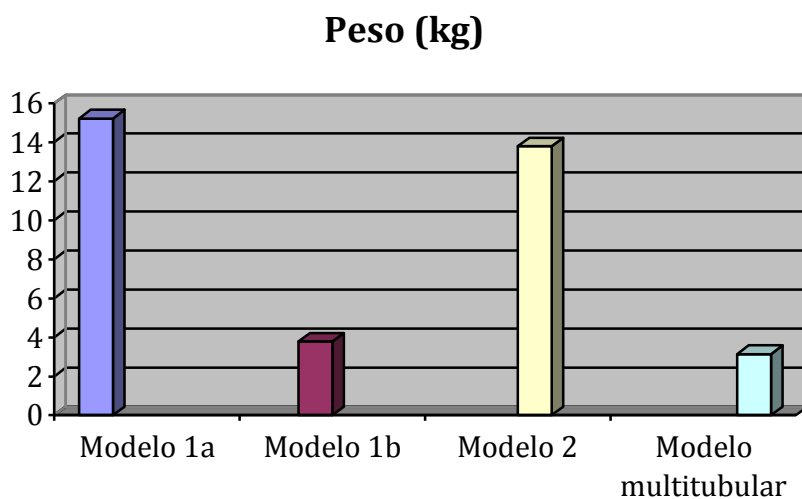


Figura 132. Gráfica comparativa de peso entre modelos de acero

6.5.4. Precio

	Precio €/kg	Modelo monobrazo 1a	Modelo monobrazo 1b	Modelo monobrazo 2	Modelo multitubular
Acero	2,30	35€	8,7€	31,7€	7,22€

Tabla 5. Precio de la materia prima de los modelos en acero

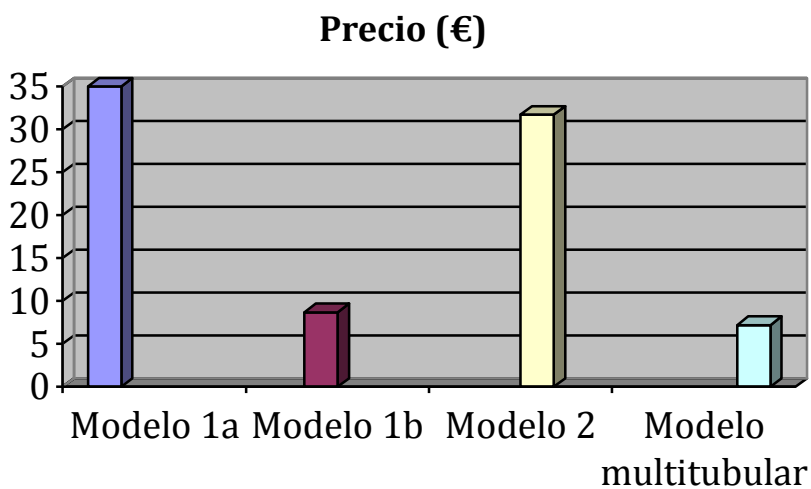


Figura 133. Gráfica comparativa de precio entre modelos de acero

6.6. Elección del diseño óptimo

Antes de decantarnos por cualquier basculante, hemos realizado una serie de análisis sobre varios parámetros importantes para la creación y la vida de nuestra pieza. En dichos estudios, hemos abarcado aspectos muy diferentes; desde la resistencia del modelo para evitar su plastificación, hasta el coste de la fabricación del mismo.

Basándonos en los gráficos anteriormente efectuados, vemos que, en cuanto a *tensión*, hemos conseguido que todos los modelos soporten las cargas y no lleguen a la plastificación; los más efectivos son el modelo macizo (modelo 1a) y el modelo aligerado (modelo 2), con 259 y 232 MPa como máxima tensión respectivamente.

Respecto a los *desplazamientos*, vuelven a ser los basculantes 1a y 2 los que mejor respuesta poseen, con desplazamientos del orden de las centésimas.

Los *pesos* mínimos los hallamos en el basculante tanto 1b como en el modelo multitubular, los cuales rondan los 3,5 kg.

Los modelos más *económicos* en cuanto a materia prima se refiere son también el modelo 1b y el multitubular.

No se ha efectuado gráfica, pero la dificultad de fabricación también es un factor a tener en cuenta.

El diseño óptimo elegido es el basculante 2 debido a:

- Estar muy por debajo de los límites de plastificación
- Alcanzar un desplazamiento máximo por debajo del resto de modelos
- Tener un precio asequible para nuestro presupuesto

Las únicas desventajas son el peso (13,8 kg) y la dificultad de fabricación, ya que la pieza tendrá que ser mecanizada.

Aunque los prototipos sean más caros de fabricar y dificultosos a la hora de poner a punto los elementos colindantes, se ha escogido el modelo 2 debido al interés en el apartado de “Innovación tecnológica” que tiene la competición Motostudent II.

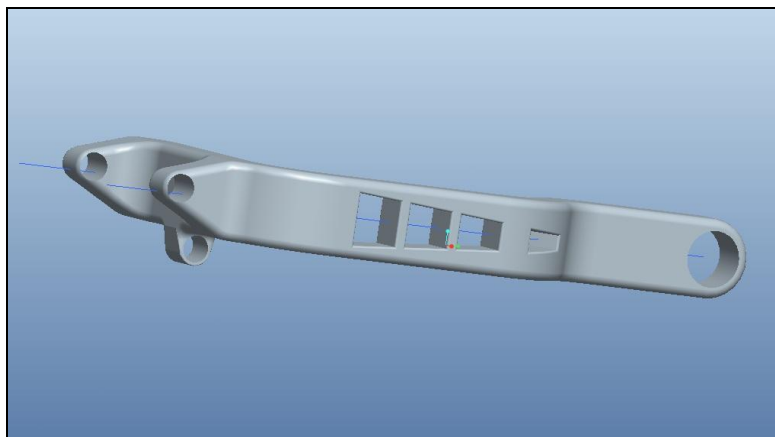


Figura 134. Basculante escogido: Modelo 2

7. Presupuesto

En este apartado, se van a analizar los costes que ha generado la elaboración del proyecto. Dividiremos dichos gastos en los siguientes grupos:

- Coste de personal
- Coste de equipos informáticos
- Coste de licencias
- Otros costes

Coste de personal

Uno de los costes más relevantes para el presupuesto del proyecto es el importe imputable al personal. Debemos calcular el coste total de personal, en función de las horas que ha dedicado al presente proyecto.

En este caso, la elaboración del proyecto ha requerido en total cuatro meses. Teniendo en cuenta que se han dedicado 15 horas semanales, los datos referentes al número de horas trabajadas son los siguientes:

Tiempo de desarrollo del proyecto	16 semanas
Horas trabajadas/semana	15
Total horas empleadas en el proyecto	240
Total coste de personal	8.400€

Tabla 6. Coste de personal

Para el cálculo del coste de personal se debe tener en cuenta el trabajo que se ha desempeñado, en este caso se ha dedicado tiempo a la organización y gestión de la información, al modelado de los componentes, al análisis y simulación del conjunto y a la elaboración del proyecto. Como es lógico el precio por hora de cada labor es muy distinta asique se estima un precio promedio de 35 €/hora. Por tanto, el coste total del personal ascenderá a 8.400€.

Coste de equipos informáticos

Se inventariará todo el instrumental tecnológico requerido para la elaboración del proyecto.

PC Asus A53S	800€
Estimación amortización PC	1/20
Disco duro externo SSD 80 Gb	110€
Total coste de equipos informáticos	150€

Tabla 7. Coste de equipos informáticos

Coste de licencias

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado los siguientes programas informáticos: ProEngineer y Microsoft Word.

El coste del procesador de textos Microsoft Word se despreciará debido a entrar dentro del paquete ofimático de Microsoft obtenido con la compra del PC.

Para el cálculo del coste total de la licencia de ProEngineer hemos de tener en cuenta la amortización del mismo. A pesar de que el proyecto se ha desarrollado durante tres meses, las licencias se alquilan durante un año completo.

Precio licencia ProEngineer	15.000 €
Estimación amortización ProEngineer	1/16
Total coste licencias	937.5€

Tabla 8. Coste de licencias

Otros Costes

Son costes relacionados directamente con la ejecución del proyecto.

Desplazamientos	250€
Impresión de documentos	300€
Total otros costes	550€

Tabla 9. Otros costes

Costes totales del proyecto

Se obtienen sumando los costes asociados a personal, equipos, licencias y otros costes.

Coste de personal	8.400€
Coste de equipos informáticos	150€
Coste licencias	937.5€
Otros costes	550€
Total	10.037,5€

Tabla 10. Costes totales

8. Conclusiones y desarrollos futuros

8.1. Conclusiones

El objetivo para el que se ha elaborado este proyecto se encuentra centrado en el diseño del basculante y el sistema de amortiguación que proporcione las prestaciones óptimas a una motocicleta de 250 cc y cuatro tiempos, para la participación en la competición Motostudent.

Construir una motocicleta requiere un largo proceso de estudio y desarrollo. Así, a lo largo del proyecto se han desarrollado los distintos pasos para ir definiendo la geometría de la suspensión trasera que nos dé el comportamiento buscado y la geometría del basculante, hasta llegar a los diseños definitivos.

Para la realización de estos diseños han sido necesarios estudios preliminares, especialmente importantes los realizados acerca de la geometría óptima que nos aporte el mejor comportamiento en carrera. Además de la búsqueda de la solución que mejor se adaptaba a nuestras necesidades.

Otra de las tareas imprescindibles para el desarrollo del proyecto ha sido el estudio de los diferentes programas de modelaje y análisis utilizados, sin los cuales no hubiera sido posible la realización del proyecto. Finalmente se ha optado por usar el programa ProEngineer.

Por otra parte, el estudio más interesante y que más conocimientos ha aportado ha sido el estudio mediante elementos finitos de las diferentes estructuras.

Para llegar a optimizar el basculante hemos realizado diferentes simulaciones comparativas buscando siempre maximizar aquellas propiedades que considerábamos importantes.

Primeramente realizamos un estudio para observar cómo debería ser el comportamiento de la suspensión trasera, basándonos en una motocicleta de competición comercial.

Buscamos la geometría que nos informase del comportamiento deseado y que no diese problemas de fabricación, teniendo muy en cuenta el espacio disponible para el diseño.

Luego realizamos diferentes simulaciones (comparando los resultados de las mismas) buscando optimizar la geometría del basculante en función de la rigidez.

Por último, efectuamos un análisis detallado de los modelos en elementos finitos que nos permitió estudiar aquellas zonas donde aparecían concentración de tensiones. Este último ensayo fue clave a la hora de la elección del tipo y tamaño de material que utilizaremos para la fabricación del basculante.

Para la selección del modelo óptimo, hemos tenido en cuenta varias características como son:

- *Tensión*: hemos conseguido que todos los modelos soporten las cargas y no lleguen a la plastificación; los más efectivos son el modelo macizo (modelo 1a) y el modelo aligerado (modelo 2), con 259 y 232 MPa como máxima tensión respectivamente.
- *Desplazamientos*: los basculantes 1a y 2 son los que mejor respuesta poseen, con desplazamientos del orden de las centésimas.
- *Peso*: Los modelos más ligeros son el 1b y el multitubular, difiriendo muy poco de los 3,5 kg.
- *Costo de materia prima*: los más económicos son el modelo 1b y el multitubular.

- *Dificultad de fabricación:* El modelo multitubular exigirá un potro para su soldadura, y los modelos 1 y 2 requerirán mecanizado y un molde y cera para crear la cáscara.

Se llegó a la conclusión de que el diseño óptimo es del basculante 2 debido a:

- Estar muy por debajo de los límites de plastificación.
- Alcanzar un desplazamiento máximo por debajo del resto de modelos.
- Tener un precio asequible para nuestro presupuesto.

Las únicas desventajas son el peso (13,8 kg) y la dificultad de fabricación, ya que la pieza tendrá que ser mecanizada y requerirá de un proceso de molde y cera para realizar la cáscara.

Aunque los prototipos sean más caros de fabricar y dificultosos a la hora de poner a punto los elementos colindantes, se ha escogido el modelo 2 debido al interés en el apartado de “Innovación tecnológica” que tiene la competición Motostudent II. Aún no se sabe a ciencia cierta si dicho modelo será el utilizado en la competición; esta cuestión se debatirá en un futuro.

La evaluación definitiva de si el diseño es válido o hay que cambiarlo se verificará una vez montado nuestro conjunto de suspensión con el resto de elementos de la motocicleta y realizados los ensayos oportunos.

Tras el test de funcionamiento de la motocicleta podremos analizar qué fallos tiene o qué posibles mejoras se le pueden aplicar. En estos análisis es muy importante la opinión del piloto sobre la rigidez del conjunto, ya que no existe la geometría óptima para una moto, sino para un binomio moto-piloto. Toda esta información nos permitirá ir optimizando los diferentes parámetros de forma que el conjunto de la amortiguación trasera y el basculante irá evolucionando hasta llegar al recomendable.

La situación óptima sería la fabricación del modelo de basculante propuesto en este proyecto para poder verificar si realmente cumple con los datos obtenidos en los análisis.

Con todo ello se puede concluir que se trata de un proyecto muy enriquecedor, que no acaba aquí, sino que futuros trabajos complementen el aquí presentado hasta alcanzar el diseño final de la motocicleta original, fiable y competente para participar en la competición de Motostudent.

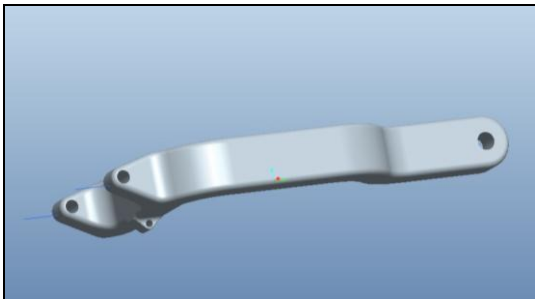


Figura 136. Modelo 1

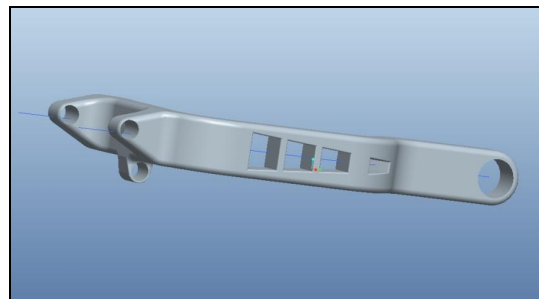


Figura 135. Modelo 2

8.2. Desarrollos futuros

El volumen que supone este trabajo es casi infinito y abordarlo completamente es prácticamente imposible; por ello he dejado marcados algunos aspectos sobre los que no se ha ahondado y podrían ser de interés para su posterior estudio:

- *Estudio de suspensiones alternativas:* tanto en geometría (por ejemplo las CDLI: Cantilevered Independent Dynamic Linkless Indispension- basculante independiente dinámico sin uniones, mostrado en la figura 135), como en funcionamiento interno (suspensiones electrónicas) para permitir una regulación óptima de nuestro sistema de suspensión.



Figura 137. Vista general del scooter Shocked

- *Cálculo a fatiga:* Como el basculante y sistema de suspensión al que va dirigido este proyecto es a un prototipo de moto de competición que solo va a rodar un día no se ha estudiado la posible duración de las piezas.
- *Simulación:* La simulación del conjunto con el resto de la moto.
- *Sistema de doble tracción:* el funcionamiento se basa en el movimiento fluido hidráulico a través de un sistema cerrado; la fuerza que la rueda trasera no utiliza cuando derrapa es cedida a la delantera mediante presión en el fluido a la rueda delantera mediante un motor de alta velocidad alojado en ella.



Figura 138. Detalle del sistema 2WD

9. Bibliografía

9.1. Referencias bibliográficas

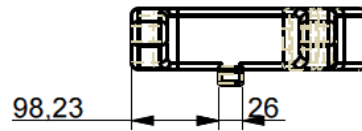
- 1) Paul Thede & Lee Parks: "Race Tech's Motorcycle Suspension Bible". Año ISBN: 978-0-7603-3140-8
- 2) Tony Foale: "Motorcycle handling and chassis design: the art and science". Second edition. March 2006. ISBN: 84-933286-3-4.
- 3) Vittore Cossalter: "Motorcycle Dynamics". Second edition. Año 2006. ISBN: 978-1-4303-0861-4
- 4) Gaetano, Cocco. "Motorcycle design and technology". Milán: Giorgio Nada Editore, 1999.
- 5) John Bradley: "The racing motorcycle: A technical guide for constructors". Año 2003. ISBN 0951292919, 9780951292914
- 6) Kayaba. Manual de suspensiones. Año 2010.
- 7) Yamaha. Manual del propietario YZF 250. Año 2009.
- 8) Yamaha. Manual de taller YZF 250 2009
- 9) Öhlins. Documentos técnicos internos sobre suspensiones. 2012.
- 10) Arias-Paz Guitian, Manuel: Motocicletas. Madrid: Ed. Dossat. 32ª edición. Año 2003
- 11) Revista "La moto". Números entre Noviembre del 2011 (259) y Mayo del 2012 (265).
- 12) Transparencias de la asignatura "Resistencia de materiales". Universidad Carlos III de Madrid. Titulación I.T.I. Mecánica. Año 2010/2011.
- 13) Transparencias de la asignatura "Diseño de máquinas". Universidad Carlos III de Madrid. Titulación I.T.I. Mecánica. Año 2010/2011.
- 14) Apuntes de la asignatura "Materiales". Universidad Carlos III de Madrid. Titulación I.T.I. Mecánica. Año 2010/2011.
- 15) Normativa general MotoStudent. Año 2011/2012.
- 16) Normativa técnica MotoStudent. Año 2011/2012.
- 17) Miguel Velázquez Kennedy. Trabajo fin de Grado: "Propuesta de un basculante y sistema de suspensión para una moto de competición" Universidad Carlos III de Madrid. Año 2012.
- 18) Tania Folguera. Trabajo dirigido: "Modelado en Pro-e". Universidad Carlos III de Madrid. Año 2011.
- 19) Tania Folguera. Proyecto Fin de Carrera: "Estudio de las vibraciones autoexcitadas en el tren delantero de un motocicleta". Universidad Carlos III de Madrid. Año 2011.
- 20) Yolanda Colás. Proyecto Fin de Carrera: "Prototipo de chasis para motostudent. Diseño y estudio". Universidad Carlos III de Madrid. Año 2009.

9.2. Referencias de la web

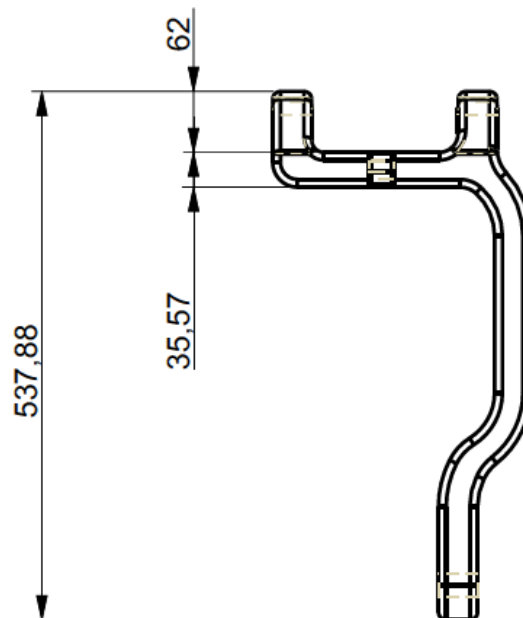
- 21) Fabricante de amortiguadores para motocicletas
<http://www.ohlins.com/>
(último acceso 21-2-2012)
- 22) Web de artículos sobre motocicletas de competición
<http://motoracerx.wordpress.com/>
(último acceso 19-3-2012)
- 23) Enciclopedia online
<http://es.wikipedia.org/>
(último acceso 5-3-2012)
- 24) Plataforma de publicaciones personales y blogs
<http://www.wordpress.com/>
(último acceso 9-2-2012)
- 25) Proyecto de diseño abierto de una motocicleta de competición
<http://www.lamoto2.es/>
(último acceso 14-1-2012)
- 26) Web sobre motociclismo
<http://www.voromv.com/>
(último acceso 25-3-2012)
- 27) Ingeniería aplicada a motocicletas y accesorios par alas mismas
<http://www.torsal.es/>
(último acceso 19-11-2011)
- 28) Suministrador de tubos
<http://reynoldstechnology.biz/>
(último acceso 29-3-2012)
- 29) Diseño de una motocicleta de competición
www.bottpower.com
(último acceso 15-2-2012)

ANEXO A. Planos

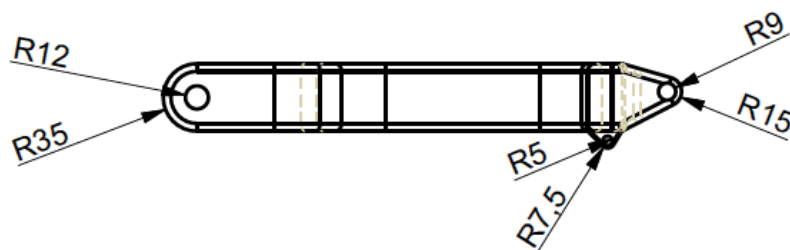
A1. Modelo 1a



Alzado

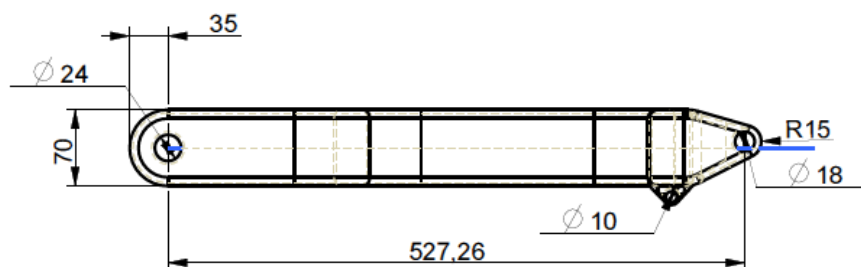
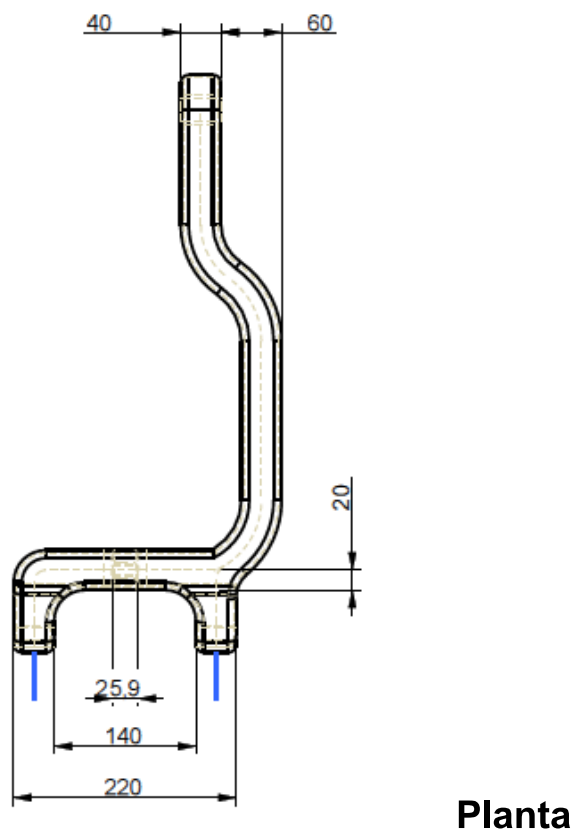


Planta

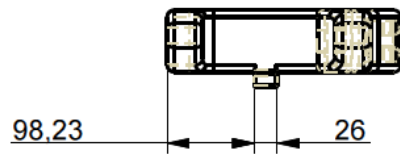


Perfil

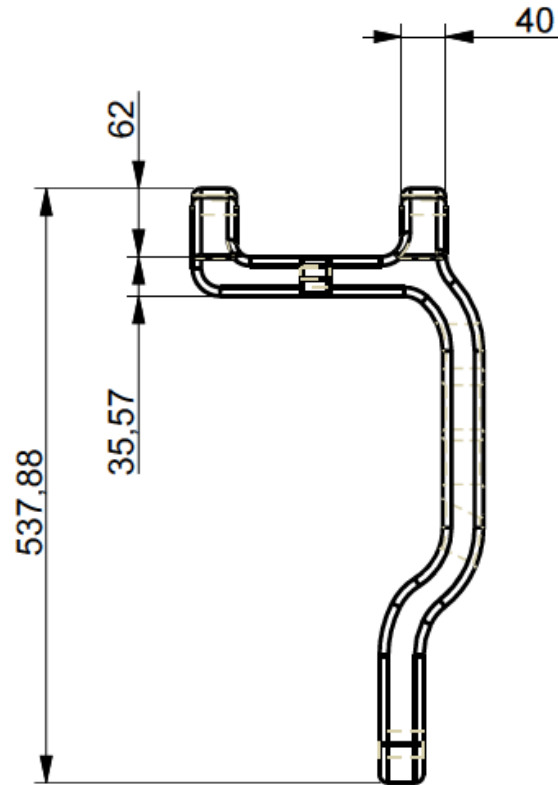
A2. Modelo 1b



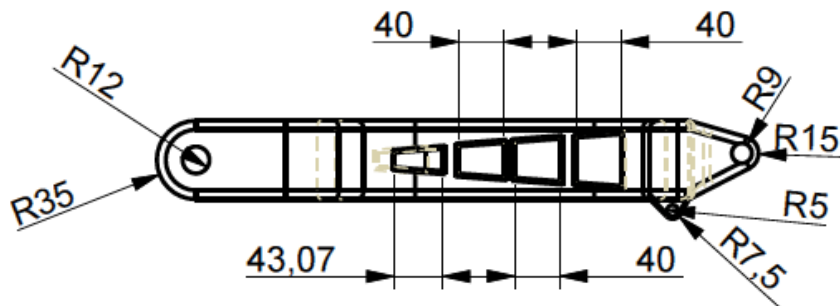
A3. Modelo 2



Alzado



Planta



Perfil